

**Bestimmung des durchschnittlichen,  
windinduzierten Luftwechsels in einem Atrium  
am Beispiel des EnergieForums Berlin**

Von der  
Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina  
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte

**Dissertation**

von  
Frauke Gerder  
aus Georgsmarienhütte

Eingereicht am	10. Mai 2006
Mündliche Prüfung am	20. Dezember 2006

Berichterstatter	Prof. Dr.-Ing. M.N. Fisch
	Prof. Dr.-Ing. D. Hosser

---

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Gebäude- und Solartechnik der TU Braunschweig.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Manfred Norbert Fisch für die freie Hand bei der Entwicklung des Themas und die anschließende Förderung und Betreuung.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dietmar Hosser danke ich für die freundliche Übernahme der Berichterstattung und die Vertretung im Fachbereich Bauingenieurwesen.

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Institutes für Gebäude- und Solartechnik, die mit Rat und Tat zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, sei an dieser Stelle herzlichst gedankt. Besonders danke ich Herrn Dipl.-Ing. Mani Zargari für die wertvolle Unterstützung bei der Durchführung der Tracergasmessungen und die kritische Durchsicht der Arbeit. Ebenso gilt mein Dank Herrn Dr.-Ing. Reinhold Dobbernack für die Betreuung und die hilfreichen Anmerkungen seitens des Institutes für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB).

Mülheim, Mai 2006

---

## Inhaltsverzeichnis

<b>Nomenklatur .....</b>	<b>IV</b>
<b>1 Einleitung und Literaturüberblick .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Gebäudeaerodynamik .....</b>	<b>5</b>
2.1 Grenzschichtströmung.....	6
2.2 Druckbeiwerte .....	8
2.3 Windkanalstudien in der Gebäudeaerodynamik .....	10
2.4 Ähnlichkeitskriterien für die Untersuchung am Modell .....	11
2.4.1 Reynolds-Zahl .....	11
2.4.2 Strouhal-Zahl.....	13
2.4.3 Jensen-Zahl.....	13
<b>3 Natürliche Lüftung von Gebäuden .....</b>	<b>15</b>
3.1 Grundformen der Raumströmung .....	16
3.1.1 Verdrängungslüftung.....	16
3.1.2 Mischlüftung .....	17
3.1.3 Kurzschlussströmung .....	17
3.1.4 Quellsüftung .....	17
3.2 Definition des Luftwechsels.....	18
3.3 Tracergasmessungen .....	20
3.3.1 Konzentrationsabfall-Methode.....	21
3.3.2 Konstant-Injektions-Methode.....	22
3.4 British Standard Method .....	23
<b>4 EnergieForum Berlin .....</b>	<b>25</b>
4.1 Projektbeschreibung .....	25
4.2 Regelstrategie Atriumlüftung.....	28
4.3 Raumlufttemperaturen im Atrium.....	30
4.4 Windkanalstudie EnergieForum Berlin.....	33

---

<b>5</b>	<b>Luftwechseluntersuchungen im Atrium</b>	36
5.1	Mess-System	36
5.2	Tracergas	38
5.3	Durchführung der Luftwechseluntersuchungen	39
5.3.1	Messung im Winter	42
5.3.2	Messung in der Übergangszeit	47
5.3.3	Messung im Sommer	49
5.3.4	Zusammenfassung der Ergebnisse der Luftwechseluntersuchungen	51
5.4	Unsicherheit der Messergebnisse	51
<b>6</b>	<b>Simulationsstudie</b>	54
6.1	Beschreibung des Simulationsprogramms	54
6.2	Validation	54
6.2.1	Druckbeiwertverteilung an würfelförmigen Gebäuden	55
6.2.2	Kalibrierung des Simulationsmodells auf Basis der Windkanalstudie	60
6.2.3	Vergleich der Druckbeiwerte Windkanalmessung - Simulation	61
6.2.4	Einfluss des Turbulenzgrades in der Anströmung	63
6.3	Parameterstudie Raumluchtströmung	64
6.3.1	Simulationsergebnisse	65
6.3.2	Wirksame Druckdifferenz	68
6.3.3	Luftaustauschwirkungsgrad	71
<b>7</b>	<b>Vergleich Messung - Simulation - Berechnung nach BSM</b>	76
7.1	Luftwechseluntersuchung in der Übergangszeit	76
7.2	Luftwechseluntersuchung im Sommer	80
7.3	Luftwechseluntersuchung im Winter	84
7.4	Durchschnittlicher windinduzierter Luftwechsel	87
<b>8</b>	<b>Anwendung in der Praxis</b>	91
8.1	Gebäudemodell	92
8.2	Simulationsergebnisse	93
8.3	Durchschnittlicher, windinduzierter Luftwechsel	96
8.4	Prüfung des Diagramms	96

---

<b>9 Zusammenfassung .....</b>	<b>100</b>
<b>Erklärung .....</b>	<b>104</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>105</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>109</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>113</b>
<b>Anhang.....</b>	<b>114</b>
A: Simulationsergebnisse .....	114
B: Ergebnisse der Windkanaluntersuchung .....	122
C: Luftaustauschwirkungsgrade für alle untersuchten Varianten .....	130
D: Erläuterungen .....	134

## Nomenklatur

Größe	Einheit	Bedeutung
A	[m <sup>2</sup> ]	Öffnungsfläche
C	[ppm]	Tracergaskonzentration
c <sub>D</sub>	[-]	Durchflusskoeffizient
c <sub>p</sub>	[-]	Druckbeiwert
c <sub>p,rms</sub>	[-]	Standardabweichung des Druckbeiwertes c <sub>p</sub>
d <sub>0</sub>	[m]	Nullpunktverschiebung
f	[1/s]	Frequenz
g	[m/s <sup>2</sup> ]	Erdbeschleunigung
H <sub>Bezug</sub>	[m]	Bezugshöhe
I	[-]	Turbulenzintensität
k	[-]	Spitzenfaktor
L <sub>ref</sub>	[m]	Referenzlänge
n	[h <sup>-1</sup> ; s <sup>-1</sup> ]	Luftwechsel
n	[-]	Anzahl der Messpunkte
p	[Pa]	Druck
p <sub>ref</sub>	[Pa]	statischer Luftdruck in der Referenzhöhe
q <sub>ref</sub>	[Pa]	Referenzstaudruck in der Referenzhöhe
r	[-]	Korrelationskoeffizient
s	[-]	Standardabweichung
T	[K; °C]	Lufttemperatur
t	[h]	Zeit
u	[m/s]	Windgeschwindigkeit
$\bar{u}(z)$	[m/s]	zeitlich gemittelte Geschwindigkeit
u <sub>ref</sub>	[m/s]	Referenzgeschwindigkeit
$\dot{V}$	[m <sup>3</sup> /h]	Volumenstrom
V	[m <sup>3</sup> ]	effektives Raumvolumen
$\bar{x}, \bar{y}$	[-]	Mittelwerte der x- bzw. y-Koordinaten der n Messpunkte
z	[m]	Höhe über Grund
z <sub>0</sub>	[m]	Rauhigkeitshöhe
z <sub>ref</sub>	[m]	Referenzhöhe

---

Größe	Einheit	Bedeutung
$\alpha$	[-]	Profilexponent
$\eta_a$	[-]	Luftaustauschwirkungsgrad
$\sigma$	[-]	Standardabweichung
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte der Luft
$\tau_E$	[s; h]	Luftaustauschzeit
$\tau_n$	[s;h]	nominale Zeitkonstante
$\bar{\tau}$	[s; h]	durchschnittliches Alter der Luft im Raum
$\bar{\tau}_p$	[s; h]	lokales Alter der Luft
$\nu$	[m <sup>2</sup> /s]	kinematische Zähigkeit (Viskosität) der Luft
$\Delta h$	[m]	Höhendifferenz
$\Delta p_w$	[Pa]	Druckdifferenz
$\Delta T$	[K]	Temperaturdifferenz
$\Delta t$	[h]	Zeitintervall

## Indizes

a	außen
E	Extern
i	innen
M	Modell
m	mittel; Mittelwert
N	Natur
R	Raum
Tra	Tracergas
u	Geschwindigkeitskomponente in Hauptwindrichtung
v	Geschwindigkeitskomponente quer zur Hauptwindrichtung (lateral)
w	Geschwindigkeitskomponente quer zur Hauptwindrichtung (vertikal)
Zu	Zuluft

## 1 Einleitung und Literaturüberblick

Bei vielen Neubauvorhaben ist es für den Planungsverlauf erforderlich, sich ein Bild von den windinduzierten Innenraumströmungen bei verschiedenen Windrichtungen zu machen. Der Luftwechsel im Innenraum wird insbesondere bei freier Lüftung stark von der Gebäudegeometrie, der umgebenden Bebauung und der jeweiligen Windrichtung beeinflusst. Während die durch Sonneneinstrahlung und interne Lasten eingetragene Wärme durch die Anwendung thermischer Raumsimulationsverfahren in Abhängigkeit von Gebäudestandort, Tages- und Jahreszeit sowie Bauart und Fassadentechnik hinreichend genau berechnet werden kann, lassen sich windinduzierte Drücke an Baukörpern mit komplexer Gebäudegeometrie derzeit nicht mit vertretbarem rechnerischen Aufwand ermitteln.

Zur Bestimmung von Windlastbeiwerten an Gebäuden werden in der Regel Windkanalexperimente durchgeführt. Diese Untersuchungen sind zeit- und kostenintensiv, so dass nur selten Variantenuntersuchungen möglich sind. Erst in jüngerer Zeit gewinnen numerische Methoden der Strömungssimulation an Bedeutung.

In die Bemessungsvorschriften zur Bestimmung der angreifenden Windlast (Gebäudestatik) fanden bisher ausschließlich Ergebnisse von Windkanalversuchen an einzeln stehenden Baukörpern Eingang, obwohl sich der weitaus größte Teil der bestehenden und neu zu errichtenden Gebäude in mehr oder weniger dicht bebauten Gebieten befindet. [DIN 1055]; [DIN 1991]. Bild 1.1 zeigt schematisch den Einfluss der Bebauung auf die Windströmung.

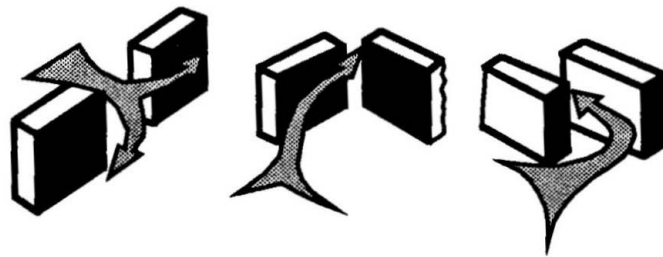


Bild 1.1: Einfluss der Bebauung [Moser]

Die Arbeiten, die sich mit einer systematischen Analyse der Gebäudeaerodynamik von bestimmten Gebäudeformen und speziellen Gebäudegruppen befassen, zeigen, dass die natürlichen Windverhältnisse durch die Bebauung erheblich verändert werden und damit auch die Druckverhältnisse am Gebäude, die für die natürliche Lüftung von Innenräumen maßgebend sind (z.B. [Kiefer], [Badde]). An vielen Stellen wird auf die Problematik der Abschätzung des Windeinflusses auf die natürliche Raumlüftung hingewiesen.

Zwischen Innen- und Außenklima besteht eine oft vernachlässigte substantielle Wechselbeziehung. Dies gilt für alle Klimafaktoren, speziell aber auch für den Wind. Die genaue Evaluation der Winddruckbeiwerte ist eine der schwierigsten Aufgaben bei der Modellierung von Infiltration und Lüftung und bisher nicht allein aus theoretischen Betrachtungen abzuleiten [Hensen].



Der Gesamtluftwechsel in normalen Aufenthaltsräumen (Büro, Wohnung) wurde in der Vergangenheit bereits umfangreich messtechnisch untersucht und bewertet, so dass im Planungsstadium von neu zu errichtenden Gebäuden eine gute Abschätzung des zu erwartenden Raumlftwechsels vorgenommen werden kann. Diese Erfahrungswerte gelten jedoch nicht für großvolumige Räume wie Atrien, an die andere Anforderungen an die Lüftung gestellt werden. Atrien sind heutzutage in vielen Entwürfen für anspruchsvolle Neubauvorhaben als gestalterisches Element und zentrales Verbindungselement zwischen verschiedenen Nutzungsbereichen enthalten. Sie werden häufig so konzipiert, dass sie zu einem großen Teil der Betriebszeit natürlich, d.h. ohne Einsatz mechanischer Lüftungsanlagen, belüftet werden. Schon in der Planungsphase besteht das Bedürfnis nach einer sicheren Voraussage der Wirksamkeit der natürlichen Durchlüftung. Sie stellen damit eine komplexe Planungsaufgabe dar [ClimaSuisse]; [Heiselberg]. An Neubauten von Atrien werden von Bauherren-, Nutzer- und Architektenseite vielfältige und sich teilweise widersprechende Anforderungen gestellt [Eisenmann]; [Kraft]:

- möglichst kostengünstige freie Lüftung und Entrauchung,
- möglichst wenig Verschattung und lichtdurchlässiges Glas,
- teilweise intensive exotische Bepflanzungen,
- geregelte Feuchteabfuhr und Vermeidung von Kondensation,
- eng begrenzte Lufttemperaturbereiche zur Wahrung des Aufenthaltskomforts,
- behagliche Versammlungs- und Präsentationsmöglichkeiten, gute Frischluftqualität.

In vielen Gebäuden dient das Atrium neben seiner Funktion als Aufenthalts- und Erschließungsbereich auch der natürlichen Luftversorgung der angrenzenden Räume. Hier kommt der Bestimmung des Luftwechsels und der Verteilung des Luftalters im Raum eine besondere Bedeutung zu. Im Gegensatz zu normalen Aufenthaltsräumen werden Atrien in den Wintermonaten nur minimal belüftet (Infiltration). Die Luftqualität ist aufgrund des großen Luftvolumens in den meisten Fällen zufriedenstellend. In der Übergangszeit und im Sommer werden hingegen möglichst hohe Luftwechsel angestrebt, um eine Überhitzung zu vermeiden. Die Luftgeschwindigkeiten sind hier unter Umständen um ein Vielfaches höher als in einem normalen Raum.

Zunehmend werden in der Planungsphase solcher Bauvorhaben Strömungssimulationen eingesetzt, um die Lüftungskonzepte zu optimieren oder Brandschutzplanungen zu ergänzen. Bei der Simulation der natürlichen Lüftung besteht das Problem in der Bestimmung von geeigneten Randbedingungen, da kein definierter Volumenstrom vorhanden ist und über die allgemeinen Ursache-Wirkungs-Beziehungen bisher noch zu wenig bekannt ist. Theoretisch fundierte und experimentell überprüfte Berechnungsregeln als Funktion aller wesentlichen Einflussparameter sind bisher nur in Ansätzen vorhanden.

Die Berechnung von Innenraumströmungen mit Hilfe von Strömungssimulationsprogrammen (CFD) ist bereits seit geraumer Zeit Gegenstand von wissenschaftlichen Veröffentlichungen. Neben der Temperaturverteilung im Raum ist die Bestimmung des Raumlufwechsels ein Schwerpunktthema. In den Arbeiten, die sich mit der Ermittlung des thermisch induzierten Luftwechsels bei Fensterlüftung beschäftigen, müssen die Randbedingungen für den Luftaustausch bei allen messtechnischen Untersuchungen fest definiert, frei einstellbar und reproduzierbar sein, um den Einfluss verschiedener Randbedingungen auf den Luftwechsel und den Temperaturverlauf im Raum exakt bestimmen zu können. Diese Forderungen sind nur für Temperaturdifferenzen als Randbedingung gegeben. Sie bilden die realen Randbedingungen allerdings nur unvollständig ab, da absolute Windstille zwar ein natürlicher meteorologischer Zustand ist, aber selten auftritt. Der thermisch bedingte Luftwechsel ist in der Regel geringer als der windinduzierte. Die ausschließliche Betrachtung des thermisch induzierten Luftwechsels stellt somit eine Minimumbetrachtung dar. Kenntnisse hierüber sind wichtig, wenn Mindestluftwechsel eingehalten werden müssen [Hall]. Der windinduzierte Luftwechsel wird infolge der in den Rechenmodellen nicht berücksichtigten Anströmrichtung in der Regel nur ungenau erfasst oder vernachlässigt [Maas], [Hall].

Die aktuellen Arbeiten, die sich mit der Simulation von Atrien bzw. der windinduzierten Lüftung in Gebäuden mit großen Öffnungen beschäftigen, verwenden als Randbedingung zur Ermittlung des Innenraumlufwechsels die äußere Druckverteilung, die mit Hilfe der  $c_p$ -Werte von geschlossenen Fassaden bestimmt wird [Seifert], [Kraft], [Niewianda]. Grundsätzlich muss die Frage gestellt werden, ob Druckbeiwerte, die an einem geschlossenen Baukörper ermittelt wurden, als Randbedingung zur Ermittlung des Innenraumlufwechsels geeignet sind, bzw. welche Fehler aus dieser Annahme resultieren.

Auch in den geltenden Normen zur Bemessung und Anordnung von natürlichen Rauchabzugsanlagen wird auf die besondere Problematik des Windeinflusses auf das Gebäude hingewiesen. Natürliche Rauchabzugsanlagen funktionieren unter Ausnutzung des thermisch bedingten Auftriebsdruckes, der unter bestimmten Umständen gegen den Druck wirken muss, der sich von außen über Windlasten aufbaut [Wilk]. Insbesondere zur Bemessung von Rauchabzugsflächen in vertikalen Außenwänden fehlen verlässliche Praxiserfahrungen für normative Festlegungen. Die Auslegung der Rauchabzugsflächen ergibt sich aus einer stationären Betrachtung, in der der Zeitpunkt der Öffnung und die damit verbundene Druckänderung nicht berücksichtigt wird [DIN 18232].

Derzeit existieren für hallenartige Räume wie Atrien weder abgesicherte Erkenntnisse über den jahreszeitlichen Verlauf des Luftaustausches noch über die sich einstellenden mittleren Werte einer Periode. Die Kenntnis dieser Größe ist allerdings Bedingung, wenn eine Abschätzung der zu erwartenden Raumlufqualität vorgenommen werden soll.

Diese Arbeit soll es durch die umfassende Untersuchung eines realen Beispielgebäudes ermöglichen, den Einfluss und die Höhe des windinduzierten Luftwechsels in einem Atrium

---

zu bestimmen. Im Rahmen der Untersuchungen soll überprüft werden, ob der Aufwand zur Erstellung eines gebäudespezifischen Diagramms zur Ermittlung des windinduzierten Luftwechsels im Atrium auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten vertretbar ist, bzw. auf welche Weise der Planungsaufwand reduziert werden kann. Die wesentliche Bedeutung kommt dabei der Bestimmung der maßgeblichen Druckdifferenz zu. Die Darstellungen sind überwiegend praxisorientiert, da die Ergebnisse dieser Arbeit dem Planer bei der Entwicklung von natürlichen Lüftungsstrategien für Atrien eine Hilfestellung sein sollen.

Als Beispielgebäude wurde das EnergieForum in Berlin gewählt. Der Gebäudekomplex besteht aus dem sanierten Magazinegebäude, zwei L-förmigen Seitenflügeln (Neubau) sowie einem verglasten Atrium (Neubau). Während der Planungsphase wurde für dieses Gebäude eine Windkanaluntersuchung zur Ermittlung der Druckbeiwerte durchgeführt [K+L]. Die Ergebnisse dieser Untersuchung werden zur Validation des Simulationsmodells herangezogen.

Im Rahmen von messtechnischen Untersuchungen wird der Luftwechsel im Atrium des Gebäudes bei verschiedenen meteorologischen Randbedingungen bestimmt. Zur Ermittlung der Volumenströme wird das Tracergas-Messverfahren eingesetzt. Die Messdaten werden mit aus der Literatur bekannten Ansätzen zur Bestimmung des Zuluftvolumenstroms verglichen. Die messtechnisch gewonnenen Ergebnisse werden im zweiten Teil der Arbeit mit CFD-Simulationen verglichen.

Die Arbeit gliedert sich in 9 Kapitel. Nach diesem einleitenden Kapitel werden in Kapitel 2 und 3 die theoretischen Grundlagen der Gebäudeaerodynamik und der natürlichen Gebäudelüftung behandelt. In Kapitel 4 wird das Gebäude beschrieben, in dem die Luftwechseluntersuchungen durchgeführt wurden. Diese werden in Kapitel 5 dokumentiert. Darauf folgt die Beschreibung der Simulationsstudie in Kapitel 6. Die Ergebnisse aus Messung, Simulation und Berechnung werden in Kapitel 7 miteinander verglichen und bewertet. Die prinzipielle Methodik zur Ermittlung des windinduzierten Luftwechsels wird an einem einfachen Anwendungsbeispiel in Kapitel 8 demonstriert. Abschließend werden die Ergebnisse in Kapitel 9 zusammengefasst.

## 2 Gebäudeaerodynamik

In üblicher, bautechnischer Betrachtungsweise ist der Wind eine Luftströmung, die bestimmte statische Belastungen durch Druck- oder Sogeinwirkung hervorruft. Dem gemäß findet er im Bau Eingang in Windlastnormen. Gerade diese Annahme ist aber für mikroklimatische Belange in den meisten Fällen unzureichend. Gebäude verändern den Wind, beschleunigen oder verzögern ihn. Bei Windanströmung bildet sich um das Gebäude ein statisches Differenzdruckfeld gegenüber dem statischen Druck der ungestörten Windströmung aus. Das Gebäude verändert die Grenzschichtströmung und erzeugt ein geometriespezifisches, bereichsweise instationäres Druckfeld. Je nach Art des Gebäudes ist mit Wechselwirkungen zwischen Druckschwankungen und Strukturverformungen bzw. -bewegungen zu rechnen. Grundsätzlich wird zwischen vier Wechselwirkungen von Grenzschichtströmung und Tragstruktur unterschieden: die statische Antwort und die statische Stabilität sowie die dynamische Antwort und die dynamische Stabilität. Als statisch wird die Wechselwirkung bezeichnet, wenn die Struktur als starr aufgefasst werden darf, als dynamisch, wenn durch Windwirkung wesentliche Trägheitskräfte innerhalb der Struktur wirksam werden [GfA 3]. Von besonderem Interesse sind jene Bereiche des im allgemeinen komplexen Strömungsfeldes, wo starke Krümmungen der Stromlinien und Ablösungen der Strömungen von der Gebäudekontur auftreten.

Bei Antwortphänomenen geht es im einfachsten Fall darum, die aerodynamischen Druck- und Kraftkoeffizienten zu definieren. Für Auslegungszwecke werden alle an Gebäuden oder Bauteilen auftretenden Belastungen auf einen dem Quadrat einer Windgeschwindigkeit proportionalen Vergleichsdruck, den Staudruck, bezogen. Der Staudruck dient als Referenz für den Druckbeiwert  $c_p$ ; positive Beiwerte entsprechen einem Überdruck, negative Beiwerte bedeuten Unterdruck gegenüber der Umgebung. Die Belastung infolge von Winddruck ist die Resultierende von Außen- und Innendruck. Der Innendruck in einem Gebäude hängt von der Größe und Lage der Öffnungen in der Gebäudehülle ab. Bild 2.1 zeigt beispielhaft die Beeinflussung der Umströmung durch den Luftaustausch mit dem Innenraum.

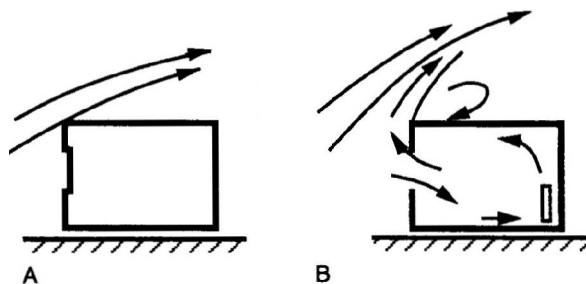


Bild 2.1: Beeinflussung der Umströmung des Gebäudes durch Luftaustausch mit dem Innenraum  
(A: Fenster geschlossen, B: Fenster geöffnet) [Moser]

Zur Ermittlung der maximal zu erwartenden Lasten benötigt man den standortabhängigen Bemessungsstaudruck. Die statische Windlast auf ein Fassadenelement ergibt sich aus der

Summe aller wirksamen Druck- und Reibungskräfte. In den meisten Fällen sind die Reibungskräfte vernachlässigbar. Die an einer Bauteiloberfläche wirkenden örtlichen Über- und Unterdrücke errechnen sich als Produkt aus örtlichem Druckbeiwert und dem Bezugsstaudruck. Zu beachten ist, dass sich die Definitionen des Bezugsstaudrucks je nach verwendetem Windlastkonzept oder zugrunde gelegter Richtlinie unterscheiden können.

In der Literatur wird über Untersuchungen der Winddruckverteilung sowohl an realen Gebäuden als auch an Modellen im Windkanal berichtet. Die experimentellen Untersuchungen zeigen, dass es wegen der Vielzahl an natürlichen Störeinflüssen sehr problematisch ist, anhand dieser Arbeiten allgemeine Beziehungen für die Winddruckverteilung an Gebäuden abzuleiten. Hinzu kommt, dass der Schwerpunkt der meisten experimentellen Arbeiten auf der Ermittlung der maximalen Windlastbestimmung für statische Fragestellungen liegt. Die Simulation von Strömungen in Windkanälen dient fast ausschließlich diesem Zweck, wobei naturgemäß aus Sicherheitserwägungen mit wahrscheinlich-maximalen Windgeschwindigkeiten laboriert wird. Weitere Fragestellungen, wie z.B. die Schlagregenbeanspruchung von Fassaden oder die Schmutzausbreitung, Frischluftversorgung und Temperaturverteilung innerhalb von Gebäuden oder Stadtgebieten werden bisher relativ selten behandelt. Die wachsende Bebauungsdichte, verbunden mit dem Zwang, die Bebauung in immer größere Höhen voranzutreiben, sowie die wachsenden energieökonomischen Ansprüche erfordern darum eine komplexere Betrachtungsweise.

## 2.1 Grenzschichtströmung

Der Wind ist eine Bewegung der atmosphärischen Luft, die auf unterschiedliche Luftdruckgradientenkräfte zurückzuführen ist. Zwischen Hochdruckbereichen und Tiefdruckgebieten entsteht eine barometrische Ausgleichsströmung, die aber auch durch die Reibungskraft, die Corioliskraft und durch Zentrifugalkräfte beeinflusst wird. Das Windströmungsfeld bis zu einer Höhe von ca. 400 m wird durch die Bodenbeschaffenheit beeinflusst. Die Erdoberfläche verzögert den ungestörten atmosphärischen Wind bis zum Stillstand am Boden (siehe Bild 2.2).

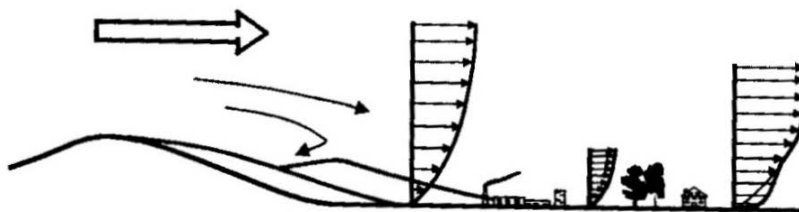


Bild 2.2: Bodengrenzschicht der Windströmung [Moser]

Einflussfaktoren sind die lokale Topographie sowie die natürliche oder künstliche Bodenrauigkeit der vom Wind überstrichenen Oberfläche. Oberhalb dieser Zone spricht man vom Gradientwind. Unterhalb der Gradientwindhöhe bis zum Erdboden bildet sich ein

Geschwindigkeitsprofil aus, in welchem durch die Turbulenz in der bodennahen Schicht, der sogenannten Grenzschicht, der Wind je nach Rauigkeit mehr oder weniger turbulent ist. Für die Windlastberechnung sind verschiedene Höhenprofile von Windgeschwindigkeit und Turbulenzintensität bereitzustellen. Bild 2.3 zeigt unterschiedliche Windprofile in Abhängigkeit der Geländeoberfläche.

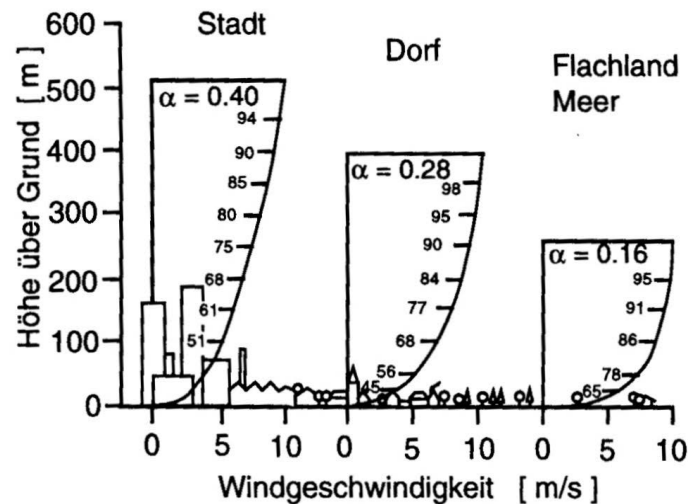


Bild 2.3: Windprofile in Abhängigkeit von der Geländeoberfläche [Moser]

Insbesondere für bauwerksaerodynamische Untersuchungen ist die Nachbildung der Windstruktur von Bedeutung. Für das Vertikalprofil der zeitlich gemittelten Geschwindigkeit  $\bar{u}(z)$  gilt näherungsweise ein Potenzansatz der Form [VDI 3783]:

$$\frac{\bar{u}(z)}{u_{\text{ref}}} = \left( \frac{z - d_0}{z_{\text{ref}} - d_0} \right)^\alpha \quad (2.1)$$

$\bar{u}(z)$	[m/s]	zeitlich gemittelte Geschwindigkeit
$u_{\text{ref}}$	[m/s]	mittlere Windgeschwindigkeit in der Referenzhöhe
$z$	[m]	Höhe über Grund
$z_{\text{ref}}$	[m]	Referenzhöhe
$d_0$	[m]	Nullpunktverschiebung
$\alpha$	[-]	Profilexponent

Die Nullpunktverschiebung  $d_0$  korrigiert den durch Bodenrauigkeiten (Bebauung, Bewuchs) verursachten Versatz des Geschwindigkeitsprofils, wobei  $d_0$  von der Form, Höhe und Anordnungsichte der Bodenrauigkeiten abhängt (siehe Tabelle 2.1).

Rauhigkeitsklasse	wenig rau	mäßig rau	rau	sehr rau
Geländetyp	Eis, Schnee, Wasserflächen	Grasland, Ackerflächen	Park, Vorstadt	Waldgebiete, Innenstadtbereiche
$z_0$ [m]	$10^{-6}$ bis $5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$ bis 0,1	0,1 bis 0,5	0,5 bis 2
$\alpha$ [-]	0,08 bis 0,12	0,12 bis 0,18	0,18 bis 0,24	0,24 bis 0,40
$d_0$ [m]	ca. 0	ca. 0	ca. $0,75 \cdot h$ (Gebäudehöhe)	ca. $0,75 \cdot h$

**Tabelle 2.1: Rauhigkeitslängen, Profilexponenten und Nullpunktverschiebungen [VDI 3783]**

Die Umströmung von Gebäuden und die daraus resultierenden Kraftwirkungen werden von der Turbulenzstruktur des Windes beeinflusst. Das Verhältnis der Standardabweichung einer Geschwindigkeitskomponente zu der mittleren Geschwindigkeit wird durch die Turbulenzintensität beschrieben. Die Turbulenzintensität ist eine wichtige Größe zur Beschreibung der Turbulenzstruktur, die z.B. auch bei der Konzeption eines Modellversuchs berücksichtigt werden muss. Die Turbulenzintensität ergibt sich aus Gleichung 2.2 zu:

$$I_i(z) = \frac{\sigma_i(z)}{\bar{u}(z)}; \quad i = u, v, w \quad (2.2)$$

$I_i(z)$	[-]	Turbulenzintensität
$\sigma_i(z)$	[-]	Standardabweichung
$u$	[m/s]	Geschwindigkeitskomponente in Hauptwindrichtung
$v$	[m/s]	Geschwindigkeitskomponente quer zur Hauptwindrichtung (lateral)
$w$	[m/s]	Geschwindigkeitskomponente quer zur Hauptwindrichtung (vertikal)

## 2.2 Druckbeiwerte

Die windinduzierte Druckverteilung auf der Gebäudeaußenhülle wird durch dimensionslose Druckbeiwerte ( $c_p$ -Werte) beschrieben. Sie wird durch die Art der Umströmung des Baukörpers bestimmt. An frontal angeströmten Flächen wird die Strömung verlangsamt und durch die Umwandlung kinetischer Energie wird ein Anstieg des Druckes hervorgerufen.

Die entstehenden Winddrücke auf den Fassaden und auf dem Dach werden durch die Bestimmung der  $c_p$ -Werte nach Gleichung 2.3 normiert, so dass Umrechnungen auf andere Windverhältnisse möglich sind.

$$c_p = \frac{p - p_{\text{ref}}}{q_{\text{ref}}} \quad (2.3)$$

$c_p$	[-]	Druckbeiwert
$p$	[Pa]	örtlich anliegender mittlerer statischer Druck auf der Oberfläche
$p_{\text{ref}}$	[Pa]	statischer Luftdruck im ungestörten Wind in der Referenzhöhe
$q_{\text{ref}}$	[Pa]	Referenzstaudruck in der Referenzhöhe

Aus der Definition des Druckbeiwertes ergibt sich, dass der positive Druckbeiwert einer frontal angeströmten Wandfläche bei komplettem Stillstand der Strömung maximal die Größe von + 1 im zeitlichen Mittel erreichen kann. An den Dach- und Seitenflächen löst sich die Strömung an den Gebäudekanten ab und in diesen Bereichen entsteht ein Unterdruck (Sog). Ob sich die Strömung am Dach oder an der Seitenwand wieder anlegt, hängt von der Geometrie des Bauwerks und dem Turbulenzgehalt der Strömung ab. An der Rückseite entsteht ein Nachlaufwirbel, welcher einen relativ konstanten Unterdruck auf der Gebäuderückseite bewirkt. Im Sogbereich gibt es im Gegensatz zum Druckbereich keine theoretische Grenze für die Größe des zeitlich gemittelten Druckbeiwertes.

Der zur Berechnung der  $c_p$ -Werte benötigte Referenzstaudruck  $q_{\text{ref}}$  errechnet sich aus der Referenzgeschwindigkeit  $u_{\text{ref}}$  :

$$q_{\text{ref}} = \frac{1}{2} \rho u_{\text{ref}}^2 \quad (2.4)$$

$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte der Luft
$u_{\text{ref}}$	[m/s]	Referenzgeschwindigkeit

Die Druckverteilung um ein Bauwerk ist in hohem Maße instationär, auch wenn die Anströmbedingungen nahezu konstant sind. Der dimensionslose Formbeiwert  $c_p$  unterliegt zeitlichen Schwankungen, hervorgerufen durch die Turbulenz der Anströmung. In der Regel verwendet man zeitlich gemittelte Werte  $c_{p,\text{mean}}$  zur Beschreibung der winderzeugten Drücke am Gebäude. Diese Mittelung kann allerdings dazu führen, dass die Windkräfte z.B. an Stellen, an denen der zeitlich gemittelte Druckbeiwert gegen Null geht, unterschätzt werden. Bei der sogenannten Spitzenfaktor-Methode [Davenport] geht bei der Bestimmung der Windlast  $W$  auch die Standardabweichung der Druckschwankungen,  $c_{p,\text{rms}}$ , in die Berechnung ein.

$$W = (c_{p,\text{mean}} \pm k \cdot c_{p,\text{rms}}) \frac{1}{2} \rho u_{\text{ref}}^2(z) \quad (2.5)$$

$k$	[-]	Spitzenfaktor
$c_{p,\text{rms}}$	[-]	Standardabweichung des Druckbeiwertes $c_p$

Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass durch die Verwendung der fluktuierenden Lastbeiwerte der Einfluss der gebäudeinduzierten Turbulenz richtig erfasst wird. Druckfluktuationen in Ablösebereichen werden wesentlich von der gebäudeinduzierten Turbulenz und nicht von der Turbulenz in der Anströmung bestimmt.

Bei einfachen Grundrissen und ohne hohe Umgebungsbebauung liegen typische Werte im Bereich von  $k = 3$  bis 7.



Bei komplizierten Grundrissen, insbesondere bei spitzen Gebäudeecken und negativen Einflüssen benachbarter Hochhäuser, sind aber auch schon Werte über 10 gemessen worden.

## 2.3 Windkanalstudien in der Gebäudeaerodynamik

Modelluntersuchungen in Windkanälen sind ein anerkanntes Verfahren zur Untersuchung von Strömungs- und Ausbreitungsvorgängen. Versuchstechnisch sind hierzu die Modellierung der atmosphärischen Grenzschicht und ein adäquates Versuchsmodell notwendig.

Parametergrößen für die Untersuchung im Windkanal sind die Windgeschwindigkeit und die Windrichtung. Aufgrund der bei turbulenten Strömungen geltenden Ähnlichkeitsbedingungen (→ Kapitel 2.4) können am kleinmaßstäblichen Bauwerksmodell ermittelte  $c_p$ -Werte aus einer Windkanaluntersuchung direkt auf die Natur übertragen werden.

Über Rauigkeitsfelder am Boden werden unterschiedliche Windprofile (Anströmungskategorien → Tabelle 2.1) nachgestellt [GfA 3]. Die Schwierigkeit, vergleichbare Randbedingungen in verschiedenen Windkanälen zu erzeugen, zeigt ein Ringversuch der Windtechnologischen Gesellschaft (WTG). Hierzu wurde das gleiche Gebäudemodell in verschiedenen Windkanälen unter „gleichen“ Randbedingungen untersucht. Bild 2.4 zeigt die Ergebnisse der Studie: die Resultate der einzelnen Windkanäle weichen um z.T. mehr als 25 % deutlich voneinander ab.

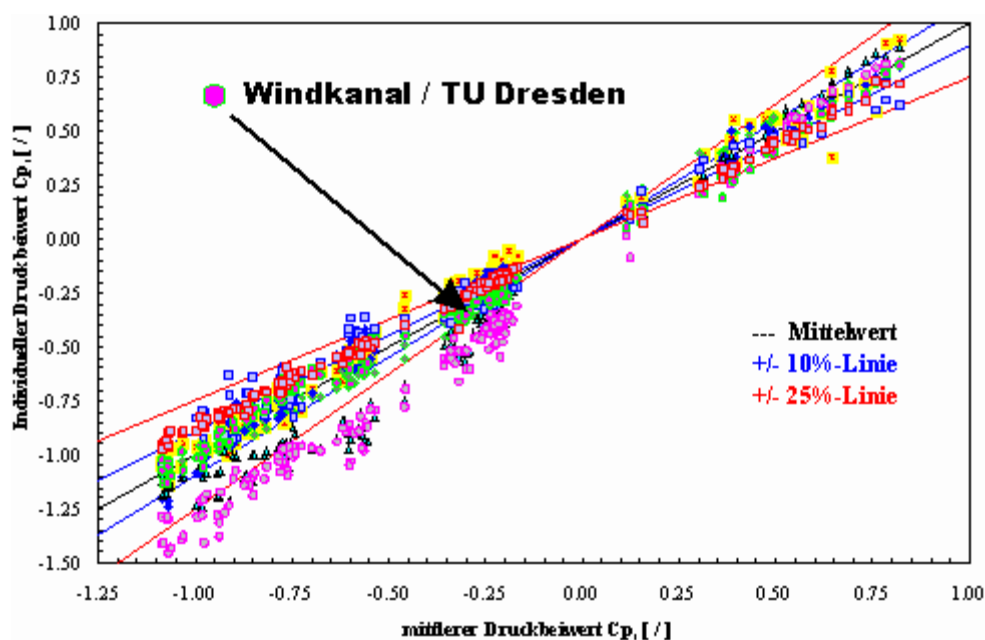


Bild 2.4: Vergleich der Ergebnisse von Modelluntersuchungen in verschiedenen Windkanälen; Ringversuch der WTG [TU Dresden]

Windkanäle, die in der Gebäudeaerodynamik eingesetzt werden, unterscheiden sich wesentlich von den klassischen, die man im Fahrzeug- und Flugzeugbau verwendet. Im klassischen Fall wird angestrebt, eine glatte, möglichst turbulenzarme Strömung zu erzeugen. Im Gegensatz hierzu ist für Gebäudeuntersuchungen die Böigkeit des Windes maßstäblich zu simulieren, d.h. es muss eine hochturbulente Strömung erzeugt werden.

## 2.4 Ähnlichkeitskriterien für die Untersuchung am Modell

Strömungsvorgänge an Gebäuden können sehr komplex sein und sind oftmals kaum analytisch zu lösen, so dass experimentelle Untersuchungen notwendig werden. Da Versuche an Originalgebäuden erst nach Fertigstellung des Gebäudes möglich wären, werden strömungstechnische Untersuchungen in der Planungsphase an einem maßstäblich verkleinerten Modell durchgeführt. Um die Übertragbarkeit der Modellergebnisse auf die realen Verhältnisse zu gewährleisten, müssen das Gebäudemodell und das Originalgebäude ähnlich sein und unter ähnlichen Bedingungen betrieben werden. Die Bandbreite reicht von 1:1000 für Ausbreitungsuntersuchungen bis 1:100 für detaillierte Betrachtungen der gebäudenahen Außenströmung oder windinduzierten Innenraumströmungen.

Neben der geometrischen Ähnlichkeit des Gebäudemodells wird ebenfalls eine geometrische Ähnlichkeit aller das Strömungsfeld charakterisierenden Abmessungen angestrebt. Dabei handelt es sich um die Grenzschichtdicke, den Nullpunktversatz des Windprofils, die Rauigkeitshöhe in der Anlaufstrecke und die typischen Abmessungen in der Grenzschicht vorhandener Wirbel und Abmessungen gebäudeinduzierter Strömungsmuster. Allgemeine Richtlinien zur Durchführung von Windkanaluntersuchungen wurden im Rahmen der [WTG] erarbeitet.

### 2.4.1 Reynolds-Zahl

Maßgebliche Bedeutung bei der Ähnlichkeit der betrachteten Strömungsvorgänge kommt der Reynolds-Zahl  $Re$  zu ( $Re_{\text{Modell}} = Re_{\text{Originalgebäude}}$ ). Sie beschreibt das Verhältnis der Trägheitskräfte zu den Zähigkeitskräften. Beschränkt man sich auf isotherme, inkompressible Strömungen in Luft, wie sie in einem konventionellen Grenzschichtwindkanal behandelbar sind, wird sie aus folgenden Referenzgrößen gebildet:

$$Re = \frac{L_{\text{ref}} \cdot u_{\text{ref}}}{\nu} \quad (2.6)$$

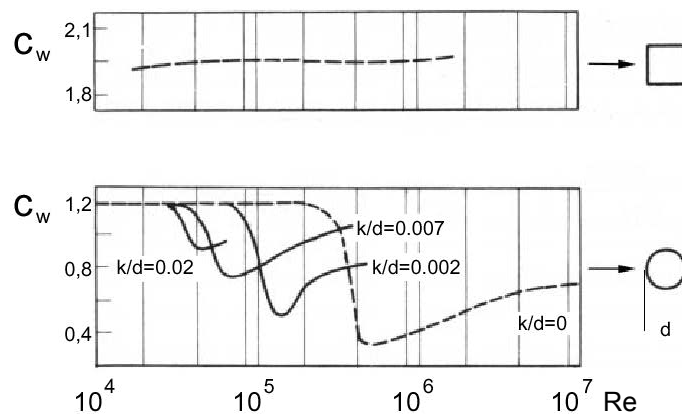
$L_{\text{ref}}$	[m]	Referenzlänge
$u_{\text{ref}}$	[m/s]	Referenzgeschwindigkeit
$\nu$	[m <sup>2</sup> /s]	kinematische Zähigkeit (Viskosität) der Luft

Zur Ermittlung der Reynolds-Zahl der Umströmung wird eine Bauwerksabmessung als charakteristisches Längenmaß benutzt. Ist die kinematische Viskosität  $\nu$  im Original und im Modellversuch gleich (das ist i.d.R. gegeben, wenn in beiden Fällen Luft in Umgebungstemperatur verwendet wird), so reduziert sich das Kriterium auf die Einhaltung des Produktes aus einer charakteristischen Windgeschwindigkeit und einer Bezugslänge.

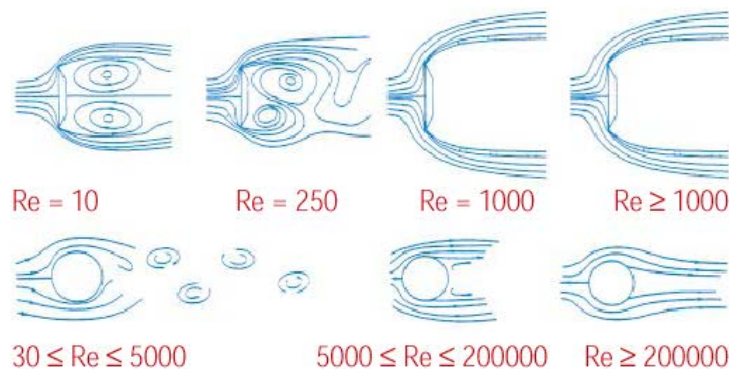
Dies bedeutet, dass bei Experimenten in üblichen Grenzschichtwindkanälen die Reynolds-Ähnlichkeit bei weitem nicht eingehalten werden kann. Bereits ein Modellmaßstab von 1:100

würde im Versuch eine nicht realisierbare, um den Faktor 100 überhöhte Windgeschwindigkeit erfordern. Bei den für Windkanaluntersuchungen üblichen Maßstäben ist dies jedoch nicht möglich. Durch Vergleiche konnte allerdings bestätigt werden, dass die Hauptabmessungen der Strömungsfelder und die Druckverteilung an Modellen kantiger Gebäude bereits ab Reynolds-Zahlen von  $2 \cdot 10^4$  bis  $10^5$  richtig wiedergegeben werden (siehe Bild 2.6). Zum Vergleich: an Originalgebäuden bewegt sich die Reynolds-Zahl in Größenordnungen von  $10^7$  bis  $10^8$ . Eine weitere Reduzierung der Fehler durch Nichteinhaltung der Reynolds-Zahl der Umströmung erfolgt durch die Verwendung scharfkantiger Modelle. Die Ablöselinien sind dadurch vorgegeben und es entsteht eine ähnliche Umströmung wie in der Natur.

Bei Gebäuden mit gerundeten Konturen, wie z.B. zylindrischen Hochhäusern gilt dies allerdings nicht. Aus diesem Grund sind im Versuch durch sorgfältige Anpassung der Oberflächenrauigkeit auf der gekrümmten Fläche (Verzicht auf geometrische Ähnlichkeit) besondere Vorkehrungen zu treffen. Die Bilder 2.5 und 2.6 zeigen beispielhaft den Strömungsverlauf an einem rechteckigen Querschnitt bzw. einer kantigen Platte und bei einer runden Geometrie für unterschiedliche Reynolds-Zahlen [GfA 2].



**Bild 2.5:** Abhängigkeit des Luftwiderstandsbeiwertes von der Reynolds-Zahl für ein Bauteil mit kantigem Grundriss (oben) und mit zylindrischem Grundriss (unten, bei verschiedenen Oberflächenrauigkeiten, nach Scruton, 1971)



**Bild 2.6:** Abweichende Reynolds-Zahlen-Abhängigkeit bei kantiger (Platte) und runder Geometrie (Zylinder nach Simiu und Scanlan) (Bild 2.5 und 2.6: [GfA 2])

### 2.4.2 Strouhal-Zahl

Bereits in dem Wind, der auf das Gebäude trifft, findet sich eine Vielzahl von Wirbelstrukturen der unterschiedlichsten Abmessungen und Ausrichtungen. Ein großer Anteil davon, der makrometeorologische Bereich, ist dem Wettergeschehen zuzuordnen und entzieht sich der Modellierbarkeit im Windkanal.

Die Wirbel, die in der anströmenden Grenzschicht enthalten sind und die, welche durch die Umströmung der Gebäudemodelle entstehen, sind in den Abmessungen ihrer Grobstruktur entsprechend dem Modellmaßstab geometrisch ähnlich zu den korrespondierenden Wirbelstrukturen im Original abzubilden. Aufgrund der viel kleineren, zurückgelegten Strecken laufen im Modellversuch alle Vorgänge um ein Vielfaches schneller ab. Den Zusammenhang zwischen den Zeitmaßen und Frequenzen der Wirbelströmungen im Modellversuch und im Original stellt man über die Strouhal-Zahl her, die für jede betrachtete Struktur im Modell und im Original gleichzusetzen ist. Eine Ähnlichkeit zwischen Modell und Original ist gegeben, wenn das Verhältnis zwischen zeitlicher und örtlicher Änderung des Luftmassenstromes gleich ist.

$$Sr = \frac{f \cdot L_{ref}}{u_{ref}} \quad (2.7)$$

$L_{ref}$	[m]	Referenzlänge
$u_{ref}$	[m/s]	Referenzgeschwindigkeit
$f$	[1/s]	Frequenz

Fährt man den Versuch z.B. mit der gleichen Windgeschwindigkeit, die auch im Original zu erwarten sein wird, reduzieren sich alle charakteristischen Zeiten entsprechend dem Modellmaßstab, alle Frequenzen erhöhen sich reziprok dazu: der Versuch bildet die Natur im Zeitraffer ab. Dies ist einer der Gründe, warum Windkanalversuche wesentlich wirtschaftlicher sind, als Messungen am Original.

### 2.4.3 Jensen-Zahl

Im unteren Bereich der Grenzschicht ist die Rauigkeitslänge  $z_0$  die einzige Längengröße, die die turbulenten Bewegungen beeinflusst. Für eine Teil-Grenzschichtmodellierung, d.h. für Gebäude, deren Höhe  $H$  sehr viel kleiner als die Grenzschichtdicke  $\delta$  ist, muss der Maßstabsfaktor aus der folgenden Beziehung, der so genannten Jensen-Zahl, bestimmt werden. Sie kennzeichnet das Verhältnis zwischen einer charakteristischen Bezugslänge des untersuchten Gebäudes (z.B. der Dachhöhe) und der Rauigkeitshöhe, dem Parameter, welcher gemeinsam mit der Verdrängungsschichtdicke  $d_0$  die Anströmung beschreibt.

Die Jensenzahl ergibt sich aus Gleichung 2.8 zu:

$$Je = \frac{H_{\text{Bezug}}}{z_0} \quad \left( \frac{H}{z_0} \right)_M = \left( \frac{H}{z_0} \right)_N \quad (2.8)$$

$H_{\text{Bezug}}$ [m]	Bezugshöhe
$z_0$ [m]	Rauhigkeitshöhe
Index M:	Modell
Index N:	Natur

Je rauer die Umgebungsbebauung, d.h. je größer  $z_0$ , desto flacher bildet sich das Höhenprofil der Windgeschwindigkeit aus. Abweichungen von der Jensen-Zahl des Originals ziehen im Modellversuch erhebliche Fehler bei der Ermittlung von Druckverteilungen nach sich.

Bild 2.7 zeigt den Verlauf der Druckbeiwerte für unterschiedliche Jensen-Zahlen. Nur bei Übereinstimmung der Jensen-Zahl lassen sich im Versuch (durchgezogene Linie) mit dem Original (gestrichelte Linie) übereinstimmende Druckbeiwerte messen. Dies lässt sich nur in Grenzschichtwindkanälen realisieren (oben links), während eine Anströmung ohne Grenzschicht völlig falsche Werte liefern kann (unten Mitte).

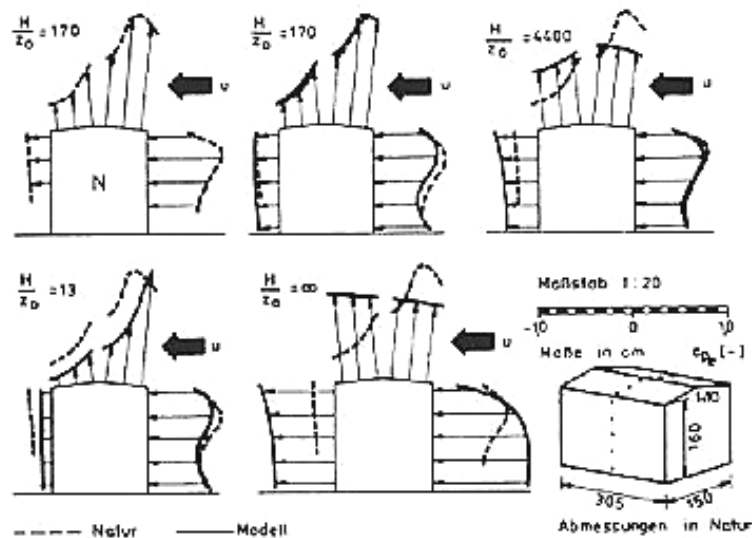


Bild 2.7: Verlauf der Druckbeiwerte für unterschiedliche Jensen-Zahlen, nach Jensen, 1961 [GfA 2]

### 3 Natürliche Lüftung von Gebäuden

Das Prinzip der natürlichen Lüftung durch zu öffnende Fenster stellt für die meisten Gebäude die einfachste und preiswerteste Form der Lüftung dar. Sie benötigt in der Regel keine elektrische Energie für den Luftaustausch und ist daher mit geringen Installations- und Betriebskosten verbunden. Man spricht von freier oder natürlicher Lüftung, wenn als Antriebskräfte ausschließlich Temperatur- und Windeinwirkung vorherrschen. Zur freien Lüftung zählen auch durch Leckagen in der Gebäudehülle verursachte Infiltrations- und Exfiltrationsvolumenströme.

Das Ziel der Lüftung ist, den Raum mit sauberer Luft zu versorgen und Schadstoffe so effizient wie möglich zu entfernen. Die Luftführung im Raum hängt von der Lage und Art der Zu- und Abluftdurchlässe, der Zuluftgeschwindigkeit, der Strömungsrichtung und der Temperaturdifferenz zwischen Zuluft und Raumluft ab.

Die natürlichen Druckwirkungen, die eine Luftdurchströmung von Gebäuden bewirken, setzen sich aus Wind- und Auftriebswirkungen zusammen. Neben den treibenden Kräften Wind und Temperatur wird zusätzlich durch die Windturbulenz und lokal an der Fassade generierte Wirbel ein Luftaustausch mit dem Innenraum induziert, auch wenn im zeitlichen oder örtlichen Mittel keine Druckdifferenzen vorhanden sind oder die Druck- und Temperatureinflüsse sich gegenseitig aufheben. Den Einflussbereich der Windturbulenz zeigt Bild 3.1.

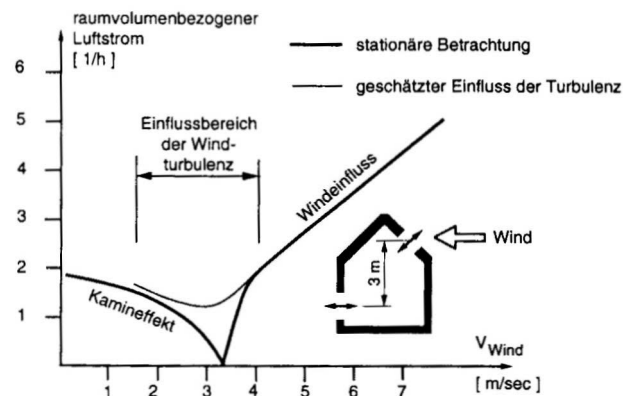


Bild 3.1: Einfluss der Windturbulenz auf den Luftaustausch [Moser]

Eine natürliche Lüftung ist schwieriger zu planen als eine mechanische Belüftung und ein kontrollierter Luftwechsel lässt sich damit nicht erreichen. Generell muss die Frage gestellt werden, ob es im Bereich der Gebäude- und Raumströmungen aufgrund der vielfältigen Wechselwirkungen „richtige“ oder „falsche“ Lösungen gibt. Rechnerisch ermittelte Angaben über die Effizienz der Lüftung für einen natürlich durchlüfteten Raum sind in der Regel integrale Werte und nicht für alle Bereiche des Raumes zutreffend. In einem normalen Raum, wie z.B. einem Büroraum, entspricht die Aufenthaltszone einem großen Anteil des Raumvolumens. In großvolumigen Räumen stellt der Aufenthaltsbereich dagegen nur einen kleinen Teil des gesamten Volumens dar. Eine ideale Lüftungsstrategie für große Räume

sollte in der Lage sein, die Komfortanforderungen gezielt in der Aufenthaltszone sicherzustellen.

### 3.1 Grundformen der Raumströmung

Um das Ziel einer sinnvollen Lüftung, nämlich eine gute Raumdurchspülung, zu erreichen, ist die Luftführung im Raum von entscheidender Bedeutung. Die Grundformen der Raumströmung sind schematisch in Bild 3.2 dargestellt und werden nachfolgend kurz beschrieben.

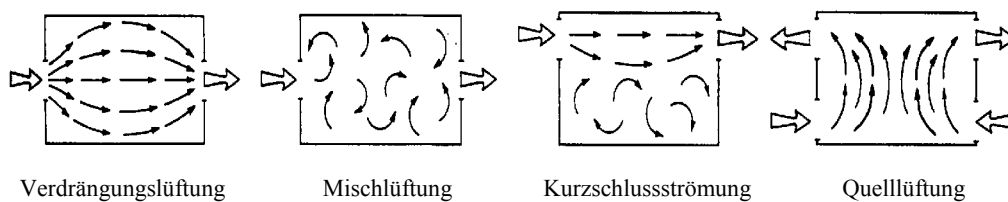


Bild 3.2: Grundformen der Raumströmung [Recknagel]

Inzwischen hat man insbesondere in Skandinavien, USA und England eine differenziertere Betrachtung der Raumdurchströmung und verfeinerte Kennzahlen und Begriffe entwickelt. Diese haben sich wesentlich an den folgenden zwei Zielen der Lüftung auszurichten:

- Die Zuluft soll möglichst vollständig in die Aufenthaltszone gelangen, d.h. möglichst keine Kurzschlussströmung außerhalb der Aufenthaltszone.
- Die Luft soll in Bezug auf Schadstoffquellen im Raum so geführt werden, dass diese schnellstmöglich in die Abluft gelangen.

Die Wirksamkeit der Lüftung wird also gemessen an ihrer Fähigkeit *alte* Raumluft in der Aufenthaltszone durch *frische* Außenluft zu ersetzen und Schadstoffe abzuführen. Auch in Deutschland sind mit der Einführung der [E-DIN 16000] erste Ansätze in dieser Richtung vorhanden.

#### 3.1.1 Verdrängungslüftung

In Reinräumen, Operationsräumen, Labors usw. sollte die Zuluft den Raum möglichst gleichmäßig, ohne nennenswerte Mischung mit der Raumluft durchströmen. Die Luft tritt hierbei gleichmäßig mit einer Geschwindigkeit von mindestens 0,15 m/s über die Eintrittsfläche in den Raum ein, durchströmt den Raum gleichmäßig und verlässt ihn auf der gegenüberliegenden Seite.

Im Idealfall bildet sich eine turbulenzarme, gleichmäßige, parallele Luftströmung zwischen Decke und Boden oder zwischen zwei gegenüberliegenden Wänden aus. Thermische Auftriebskräfte können vernachlässigt werden.

---

### **3.1.2 Mischlüftung**

Bei der Mischlüftung – auch Verdünnungslüftung oder Strahllüftung genannt – vermischt sich die eingeblasene Luft rasch mit der Raumluft. Luftgeschwindigkeit und Temperaturdifferenz werden schnellstmöglich abgebaut. Folgt die Luft zunächst tangential einer Wand oder Decke, so bilden sich Strömungswalzen aus. Bei diffuser Raumströmung hingegen wird der Coanda-Effekt bewusst vermieden. Die Mischlüftung ist für eine Vielzahl von Lüftungsarten und Räumen ohne spezielle Anforderungen gebräuchlich. Häufig wird die Raumströmung auch durch thermische Kräfte bestimmt, die Wärmequellen oder auch kalte Flächen wie Wände oder Fenster im Raum auslösen. Die Mischlüftung versucht im Gegensatz zur → Quelllüftung deren Auswirkung zu unterdrücken.

### **3.1.3 Kurzschlussströmung**

Von Kurzschlussströmung spricht man, wenn Zuluft an die Abluftöffnung gelangt, ohne vorher die Aufenthaltszone gelüftet zu haben.

### **3.1.4 Quelllüftung**

Die Quelllüftung als Sonderform der Verdrängungslüftung kommt mit geringen Luftwechselzahlen aus. Sie wird ausschließlich zur Raumkühlung eingesetzt. Die kalte Luft „quillt“ von unten ein, es bildet sich ein Kaltluftsee, der durch Wärmequellen im Raum erwärmt und durch Auftriebskräfte nach oben transportiert wird, wobei kalte Luft von unten nachströmt. Die Raumluftströmung bei der Quelllüftung wird wesentlich von thermischen Effekten bestimmt.



### 3.2 Definition des Luftwechsels

Der zwischen dem effektiven Rauminhalt  $V_R$  eines Gebäudes oder Gebäudeteils und seiner Umgebung ausgetauschte Luftvolumenstrom  $\dot{V}$  bzw. die Luftwechselzahl  $n$  gehören zu den in der Bauphysik weniger gut verstandenen Kenngrößen.

Die Luftwechselzahl  $n$  ist definiert als der Quotient aus dem Zuluftvolumenstrom  $\dot{V}_{Zu}$  und dem Gesamtvolumen der Zone  $V_R$ . Diese Definition bezeichnet jedoch nur das Verhältnis des stündlich zuströmenden Außenluftvolumenstroms zum Raumvolumen. Ein Luftwechsel von  $n=1$  bedeutet nicht zwangsläufig, dass das Raumvolumen nach einer Stunde komplett ausgetauscht wurde. Dies wäre nur im Fall einer hocheffizienten Verdrängungslüftung der Fall (siehe Bild 3.3).

Der Luftwechsel ist zunächst ein theoretischer Wert, der den Luftaustausch im optimalen Fall beschreibt und sich daher als Bezugswert eignet. Die globale Luftwechselzahl  $n$  (raumbezogener Luftvolumenstrom) ergibt sich aus dem Reziprokwert der nominalen Zeitkonstante. Die nominale Zeitkonstante beschreibt die kürzeste mögliche Verweilzeit der Luft im Raum, im Fall der idealen Verdrängungsströmung also die Zeit zwischen Eintritt und Austritt. Sie sagt über die tatsächliche Strömungsform nichts aus.

$$n = \frac{\dot{V}_{Zu}}{V_R} \quad \text{bzw.} \quad n = \frac{1}{\tau_n} \quad (3.1)$$

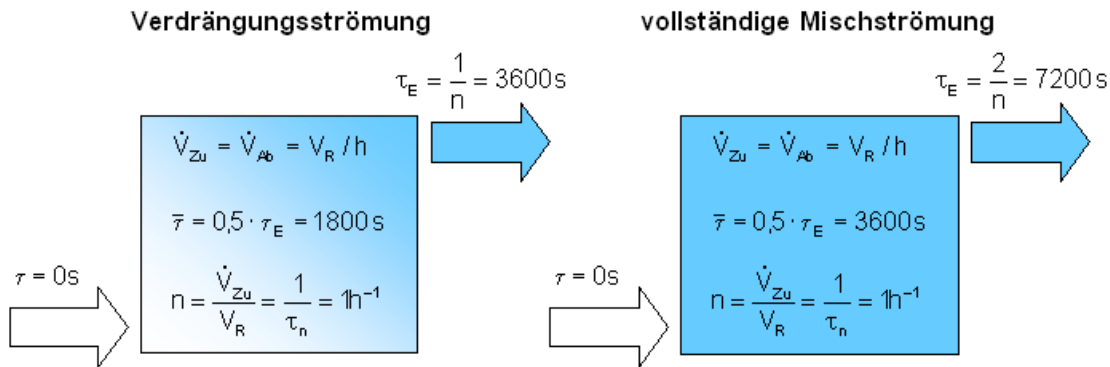
$n$	$[h^{-1}; s^{-1}]$	Luftwechsel
$\tau_n$	$[h; s]$	nominale Zeitkonstante = kürzeste mögliche durchschnittl. Verweilzeit
$\dot{V}_{Zu}$	$[m^3/h]$	Zuluftvolumenstrom
$V_R$	$[m^3]$	Raumvolumen

Aus der Verfahrenstechnik (Behälterdurchströmung) haben sich auch in der Raumluftechnik die Begriffe des mittleren Luftalters  $\bar{\tau}$  („mean age of air“) und der Luftaustauschzeit  $\tau_E$  („residence time“, Verweilzeit) durchgesetzt. In der Regel wird unterschieden zwischen dem

- lokalen Luftalter  $\bar{\tau}_p$  und
- dem örtlich gemittelten Luftalter  $\bar{\tau}$  eines Raumes.

Das lokale Luftalter  $\bar{\tau}_p$  an einem beliebigen Punkt P ist definiert durch die durchschnittliche Zeit, die die Luftmoleküle vom Eintritt in den Raum bis zum Erreichen des Punktes P benötigen. Das Durchschnittsalter der Raumluf  $\bar{\tau}$  ist die Momentanaufnahme der bisherigen Aufenthaltsdauer sämtlicher Luftmoleküle im Raum. Es ist genau halb so groß wie das durchschnittliche Höchstalter  $\tau_E$  (= Luftaustauschzeit). Die durchschnittliche Luftaustauschzeit der Raumluf,  $\tau_E$ , ist die Zeit, die die Luft benötigt, um einen Raum zu durchströmen, und

entspricht dem durchschnittlichen Alter der Luft an der Abluftöffnung. Die durchschnittliche Aufenthaltsdauer der Luftmoleküle im Raum entspricht damit dem durchschnittlichen Höchstalter der Raumluft. Bild 3.3 zeigt den Zusammenhang zwischen Luftalter beim Austritt und mittlerem Luftalter in einer Zone bei einer idealen Verdrängungsströmung und einer vollständigen Mischströmung bei gleichem Luftwechsel  $n$ .



**Bild 3.3:** Zusammenhang zwischen Luftalter beim Austritt (Luftaustauschzeit) und mittlerem Luftalter in einer Zone bei einer idealen Verdrängungsströmung und einer vollständigen Mischströmung bei gleichem Luftwechsel

Nach [Skåret] gilt grundsätzlich: Durchschnittliches Alter der Luft =  $0,5 \cdot$  Luftaustauschzeit

$$\bar{\tau} = 0,5 \cdot \tau_E \quad (3.2)$$

Der globale Luftaustauschwirkungsgrad  $\eta_a$  ist das Verhältnis der nominalen Zeitkonstanten zur Luftaustauschzeit im Raum. Er ist ein Maß für den Grad der Durchmischung von Raumluft und Zuluft und vom Luftströmungsmuster im Raum abhängig.

$$\eta_a = \frac{\tau_n}{\tau_E} = \frac{\tau_n}{2 \cdot \bar{\tau}} \quad [-] \quad (3.3)$$

$\bar{\tau}$	[s; h]	durchschnittliches Alter der Luft im Raum
$\tau_n$	[s; h]	nominale Zeitkonstante
$\tau_E$	[s; h]	Luftaustauschzeit
$\eta_a$	[-]	Luftaustauschwirkungsgrad
$\tau_E = \tau_n$	bei der Verdrängungsströmung	
$\tau_E = 2 \cdot \tau_n$	bei vollständiger Durchmischung	

Der mit der durchschnittlichen Luftaustauschzeit definierte Luftaustauschwirkungsgrad sagt nur etwas über die Strömungsform des Gesamtlufthaushalts des Raums aus, nicht aber speziell etwas über die Aufenthaltszone. Hierzu benötigt man lokale Werte (Luftaustauschindices).

### 3.3 Tracergasmessungen

In Gebäuden ist der Luftaustausch besonders schwierig zu messen, da er von sehr vielen unterschiedlichen und z.T. instationären Einflussfaktoren bestimmt wird, so dass eine Aussage zu lokalen Luftaustauschraten meist mit vielen Unsicherheiten behaftet ist. Eine indirekte Messung des Luftwechsels erlauben die sogenannten Tracergasmessverfahren (Indikatorgasmessverfahren). Tracergasmessungen basieren auf der messbaren Verdünnung eines Tracergases in Abhängigkeit vom Luftaustausch. Diese Messmethode eignet sich zur Bestimmung des Außenluftvolumenstromes und ist anderen Methoden, wie z.B. der Differenzdruckmessung an Zu- oder Abluftöffnungen überlegen, da sie die Summe aller Außenluftvolumenströme erfasst, also auch die Infiltration durch die Gebäudehülle. Das Prinzip der Messverfahren beruht darauf, dass ein inertes Spurengas (Tracergas) homogen mit der Raumluft vermischt und die Gaskonzentration als Funktion der Zeit vermessen wird. Die Auswertung dieser Zeitreihe ermöglicht dann eine Berechnung der Luftwechselzahl  $n$  bzw. des ausgetauschten Luftvolumenstroms. Eine wesentliche Voraussetzung zur erfolgreichen Durchführung einer Tracergasmessung ist die vollständige Durchmischung innerhalb des gesamten Volumens des zu untersuchenden Raumes, bzw. Gebäudes.

Ebenfalls möglich ist die messtechnische Bestimmung des mittleren Raumlufalters durch Bildung eines Durchschnittswertes aus mehreren lokalen Einzelwerten. Dies setzt allerdings eine ausreichend große Anzahl an Einzelmesspunkten voraus. Der technische Aufwand ist entsprechend hoch. Bild 3.4 gibt eine Übersicht über die in eine Messzone ein- und austretenden Tracergas-Massenströme.

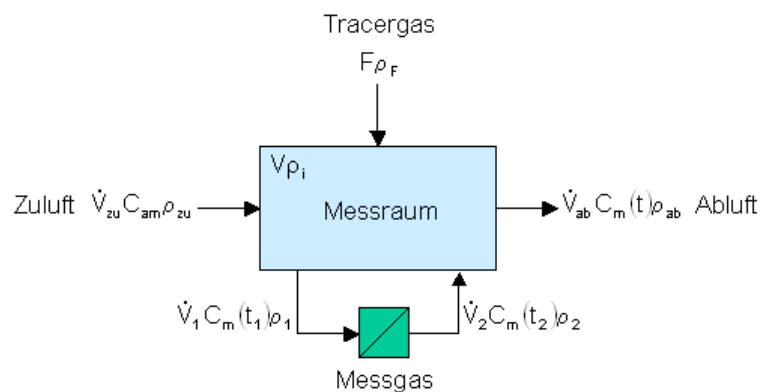


Bild 3.4: Modell für eine Messzone und ein Tracergas nach [Maas]

Zur Bestimmung des natürlichen Luftwechsels können Messungen des zeitlichen Verlaufs von Tracergaskonzentrationen in drei experimentellen Varianten benutzt werden:

- Konzentrationsabfall-Methode (→ Kapitel 3.3.1)
- Konstant-Injektions-Methode (Konstante Abgabe des Tracergases) (→ Kapitel 3.3.2)
- Konstante Konzentration des Tracergases

Die Konstant-Konzentrations-Methode erfordert eine vergleichsweise aufwändigere und teurere experimentelle Ausstattung. Sie wird deshalb hier nicht weiter betrachtet.

Nach [Fitzner] kann im Rahmen eines Tracergasversuches auch die nominale Zeitkonstante durch die Messung der Tracergaskonzentration an der Abluftöffnung bestimmt werden, wenn vor Ende der Tracergasinjektion eine gleichmäßige Konzentrationsverteilung im Raum vorhanden war. Sie berechnet sich dann nach folgender Gleichung:

$$\tau_n = \frac{\int_t^{t+\Delta t} C_E(t) dt}{C_E(t)} \quad (3.4)$$

$\tau_n$	[s;h]	nominale Zeitkonstante
$C_E$	[ppm]	Konzentration an der Abluftöffnung

Das Integral beschreibt die Fläche unter der Abklingkurve. Die Größe der Gesamtfläche ist hinreichend genau durch die Aufsummierung der Teilflächen zu bestimmen (Breite:  $\Delta t$  des Messintervalls, Höhe: durchschnittliche Konzentration in diesem Messintervall). Mit Hilfe dieser Gleichung können auch lokale Luftaustauschzahlen bestimmt werden, wenn anstelle des Konzentrationsverlaufs an der Abluftöffnung lokale Konzentrationsverläufe eingesetzt werden.

### 3.3.1 Konzentrationsabfall-Methode

Bei der am häufigsten angewendeten Konzentrationsabfall-Methode (Abklingmethode) wird Tracergas vor Beginn der Messung in den Versuchsraum eingeblasen und vermischt, so dass zu Beginn der Messung im gesamten Raum eine möglichst gleichmäßige Tracergaskonzentration vorhanden ist. Durch den Abtransport des Luft-Tracergas-Gemisches durch nachströmende Luft erfolgt ein Konzentrationsabfall. Anhand der Konzentrations-Zeit-Messwertepaare lässt sich ein Durchschnittswert für den mittleren Luftwechsel  $n_m$  berechnen.

$$n_m = \frac{T_{Zu}}{T_i} \cdot \frac{1}{\Delta t} \left( \ln \frac{C(t)}{C(t + \Delta t)} \right) \quad [h^{-1}] \quad (3.5)$$

$T_{Zu}$	[K]	Zulufttemperatur
$T_i$	[K]	Raumlufttemperatur
$C(t)$	[ppm]	Tracergaskonzentration zur Zeit t

Die Veränderung von Randbedingungen während einer Messung, wie z.B. das Öffnen von Türen und Fenstern oder ein Witterungswechsel, können den Luftwechsel stark beeinflussen und den Verlauf des Tracergas-Konzentrationsabfalls, der sich normalerweise zu einer exponentiell abfallenden Kurve ergibt, stören.

### 3.3.2 Konstant-Injektions-Methode

Bei der Konstant-Injektions-Methode wird dem Raumvolumen ab Versuchsbeginn ein konstanter Tracergasvolumenstrom zugeführt, der über den gesamten Messzeitraum konstant gehalten wird. Die an ausgewählten Punkten gemessene Tracergaskonzentration schwankt in Abhängigkeit des Außenluftvolumenstroms, der aus dem Verhältnis Tracergasvolumenstrom zur Tracergaskonzentration in der Raumluft bestimmt wird. Der vorzugebende Tracergas-Volumenstrom ist abhängig vom Raumvolumen, dem zu erwartenden Luftwechsel und der erwünschten maximalen Konzentration. Bleibt neben dem Tracergaszustrom in den Prüfraum auch der Außenluftvolumenstrom und damit der Luftwechsel konstant, stellt sich nach einiger Zeit ein Gleichgewichtszustand mit gleichbleibender Tracergaskonzentration ein. Der Luftwechsel kann dann aus diesem Konzentrations-Grenzwert  $C_\infty$ , dem Raumvolumen und der konstanten Tracergaszufuhr berechnet werden.

$$\dot{V}_{Zu}(t) = \frac{\dot{V}_{Tra}(t)}{C(t)} \quad (3.6)$$

C	[-]	Tracergaskonzentration
$\dot{V}_{Zu}$	[m <sup>3</sup> /h]	Außenluftvolumenstrom
$\dot{V}_{Tra}$	[m <sup>3</sup> /h]	Tracergasvolumenstrom

Der Hauptnachteil bei Messungen zur Ermittlung des Luftwechsels über Tracergasversuche liegt darin, dass sie von sich verändernden und nicht vorausberechenbaren Randbedingungen wie Windgeschwindigkeit und -richtung beeinflusst werden und daher nicht reproduzierbar sind. Aus Einzelmessungen lassen sich keine allgemeingültigen Aussagen über den Luftwechsel in einem Gebäude bestimmen. Langfristige Messungen sind in der Regel zu aufwändig.

### 3.4 British Standard Method (BSM)

Auch mit Hilfe von rechnerischen Methoden kann der Luftwechsel im Innenraum bestimmt werden. Weit verbreitet ist die Berechnung nach der British Standard Method, mit der sowohl der wind- als auch der temperaturinduzierte Luftwechsel unter Berücksichtigung der baulichen (Lüftungsquerschnitte; Höhendifferenz) und meteorologischen Randbedingungen ermittelt werden können.

Zur Analyse der windinduzierten Durchströmungsverhältnisse in Gebäuden kommt ein  $c_p$ -Wert-Verfahren auf der Basis einer modifizierten Bernoulli-Gleichung zur Anwendung. Die Formel stammt ursprünglich von der Durchströmung einer Blende [DIN 1952] und wurde den Verhältnissen im Gebäudebereich angepasst. Als Ergebnis dieses Verfahrens kann man den windinduzierten Volumenstrom durch das Gebäude als Funktion der örtlichen Druckdifferenz wie folgt berechnen [BS 5925]; [Allard]:

$$\dot{V}_{\text{Wind}} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{c_{D1}A_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{c_{D2}A_2}\right)^2}} \cdot \sqrt{\frac{2\Delta p_w}{\rho}} \cdot 3600 \text{ [m}^3/\text{h]} \quad (3.7)$$

$c_{Di}$	[-]	Durchflusskoeffizient
$A_i$	[m <sup>2</sup> ]	Öffnungsfläche
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte von Luft
$\Delta p_w$	[Pa]	wirksame Druckdifferenz

Ebenso wie der windinduzierte Luftwechsel lässt sich auch der thermisch induzierte Luftwechsel durch Anwendung eines Rechenmodells abschätzen. Der Volumenstrom durch den Auftriebseffekt im Gebäude wird näherungsweise als Funktion der vorhandenen Temperaturdifferenz aus Gleichung 3.8 berechnet [BS 5925]; [Allard]:

$$\dot{V}_{\text{Thermik}} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{c_{D1}A_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{c_{D2}A_2}\right)^2}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot \Delta T \cdot \Delta h}{T_m}} \cdot 3600 \text{ [m}^3/\text{h]} \quad (3.8)$$

$c_{Di}$	[-]	Durchflusskoeffizient
$A_i$	[m <sup>2</sup> ]	Öffnungsfläche
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	Erdbeschleunigung
$\Delta T$	[K]	wirksame Temperaturdifferenz zwischen innen (über die Höhe der gemittelten Innentemperatur) und außen
$\Delta h$	[m]	wirksame Höhendifferenz zwischen der Zu- und Abluftöffnung
$T_m$	[K]	mittlere absolute Temperatur zwischen innen und außen

Betrachtet man beide Anteile getrennt, zeigt sich, dass sich die Effekte keineswegs additiv überlagern. Nach der British Standard Method [BS 5925] beträgt der Luftwechsel bei Querlüftung unter *gleichzeitiger* Einwirkung von Wind und Thermik:

$$n = n_{\text{Wind}}, \text{ wenn } \frac{u}{\sqrt{\Delta T}} > 0,26 \cdot \sqrt{\frac{\Delta h}{\Delta c_p}} \text{ mit } \Delta T = T_i - T_a \quad (3.9)$$

und

$$n = n_{\text{Thermik}}, \text{ wenn } \frac{u}{\sqrt{\Delta T}} < 0,26 \cdot \sqrt{\frac{\Delta h}{\Delta c_p}} \text{ mit } \Delta T = T_i - T_a \quad (3.10)$$

$\Delta T$	[K]	wirksame Temperaturdifferenz zwischen innen und außen
$\Delta h$	[m]	wirksame Höhendifferenz zwischen der Zu- und Abluftöffnung
$u$	[m/s]	Windgeschwindigkeit
$\Delta c_p$	[-]	Druckbeiwertdifferenz

Der Durchflusskoeffizient  $c_D$  berücksichtigt die Abweichung vom idealisierten Durchfluss und ist abhängig von der geometrischen Ausgestaltung der Öffnung. Dieser Koeffizient muss experimentell ermittelt werden. Bild 3.5 zeigt beispielhaft den Durchflusskoeffizienten in Abhängigkeit des Öffnungswinkels für unterschiedlich dicke Fensterrahmen. Für voll geöffnete Fenster und Türen ist  $c_D$  etwa 0,6.

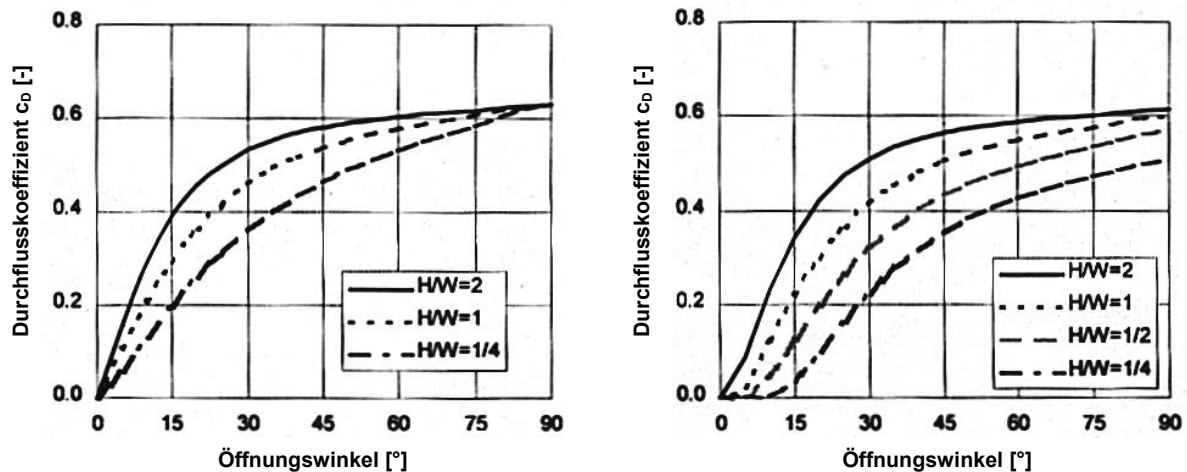


Bild 3.5: Durchflusskoeffizienten für ein Klappfenster mit horizontaler Drehachse mit dünnem Fensterrahmen (links:  $d = 5 \text{ mm}$ ,  $W = 1 \text{ m}$ ) und dickem Fensterrahmen (rechts:  $d = 60 \text{ mm}$ ,  $W = 1 \text{ m}$ ) [ClimaSuisse]

Untersuchungen von [Seifert] haben ergeben, dass Massen- bzw. Volumenströme in Gebäuden mit großen Öffnungen mit diesen Gleichungen nicht hinreichend exakt beschrieben werden. Die Umströmung und Durchströmung eines Gebäudes stehen in starker Wechselwirkung miteinander und stellen ein komplexes dreidimensionales Strömungsproblem dar, welches nur sehr unzureichend mit einem einfachen Ansatz über die Druckdifferenz aus den  $c_p$ -Werten beschrieben werden kann. Bereits die Bestimmung der relevanten Druckdifferenz bereitet bei komplexen Gebäudegeometrien erhebliche Probleme.

## 4 EnergieForum Berlin

Eines der bedeutendsten Baupotentiale der Berliner Innenstadt erstreckt sich vom Alexanderplatz über die Alexanderstraße zur Jannowitzbrücke beiderseits der Spree bis zur Elsenbrücke. In diesem Stadtraum ist der City-Ergänzungsbereich Berlin Ostbahnhof/Spreeufer ein bedeutender Schwerpunkt der Stadtentwicklung Berlins.

### 4.1 Projektbeschreibung

In den Jahren 1906 bis 1915 wurden am Stralauer Platz 33-34 in Berlin-Friedrichshain das Zentralmagazin, das Pfortnerhaus und ein zusätzliches Bürogebäude für die städtischen Gaswerke erbaut. An dieser Stelle entstand Anfang 2000 der neue Gebäudekomplex „EnergieForum Berlin“, bestehend aus dem sanierten Magazingebäude, zwei L-förmigen Seitenflügeln (Neubau) sowie einem verglasten Atrium (Neubau) mit insgesamt ca. 22.140 m<sup>2</sup> NGF. Bild 4.1 zeigt die Ansicht des sanierten Magazingebäudes sowie Grundriss des Gebäudes. Die Lage des Gebäudes zeigt Bild 4.2.

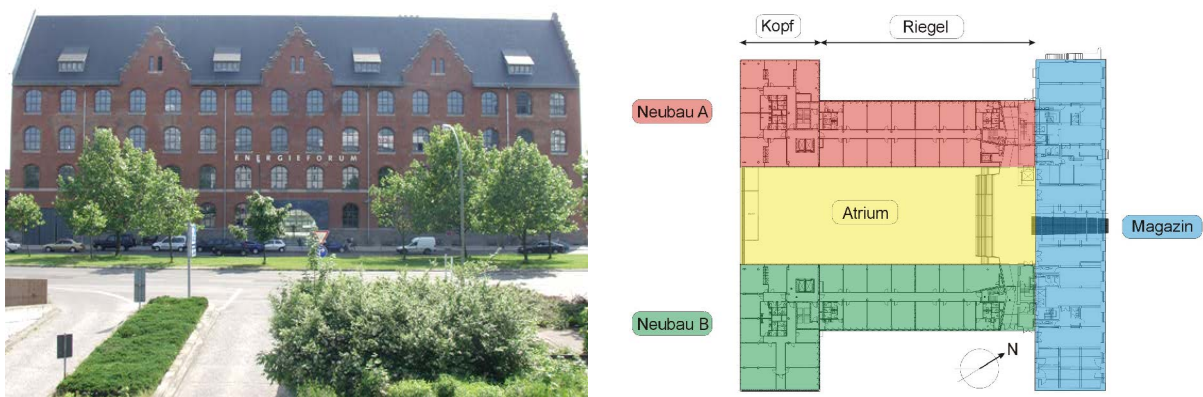


Bild 4.1: links: Nordost-Ansicht des Magazingebäudes; rechts: Grundriss des Gebäudes

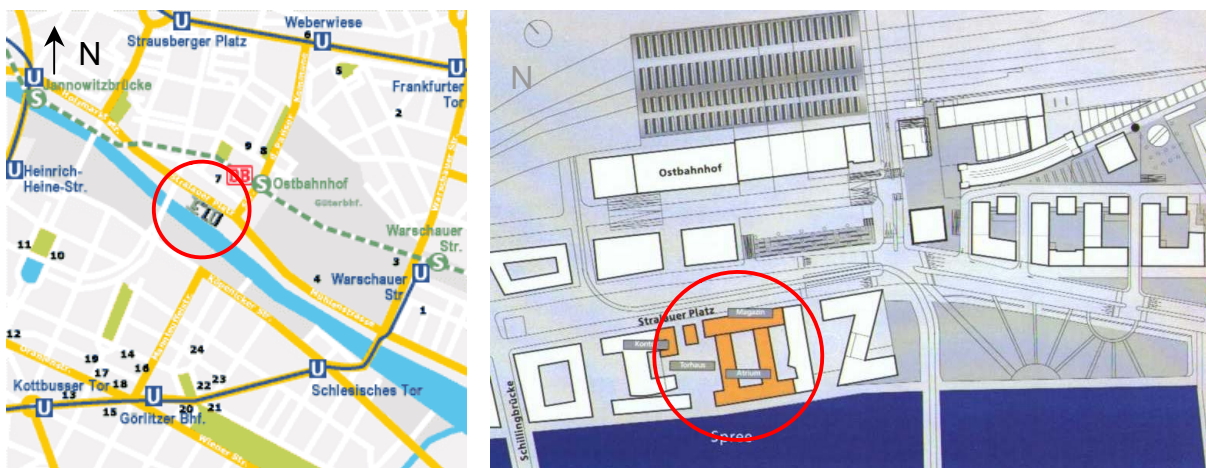


Bild 4.2: Lageplan



Der Standort gegenüber dem Ostbahnhof hat für das EnergieForum Berlin elementare Standortvorteile:

- die Lage auf der Sonnenseite der sich an dieser Stelle stromartig aufweitenden Spree,
- die günstige Verkehrsanbindung und
- die unmittelbare Nähe zum historischen Zentrum Berlins.

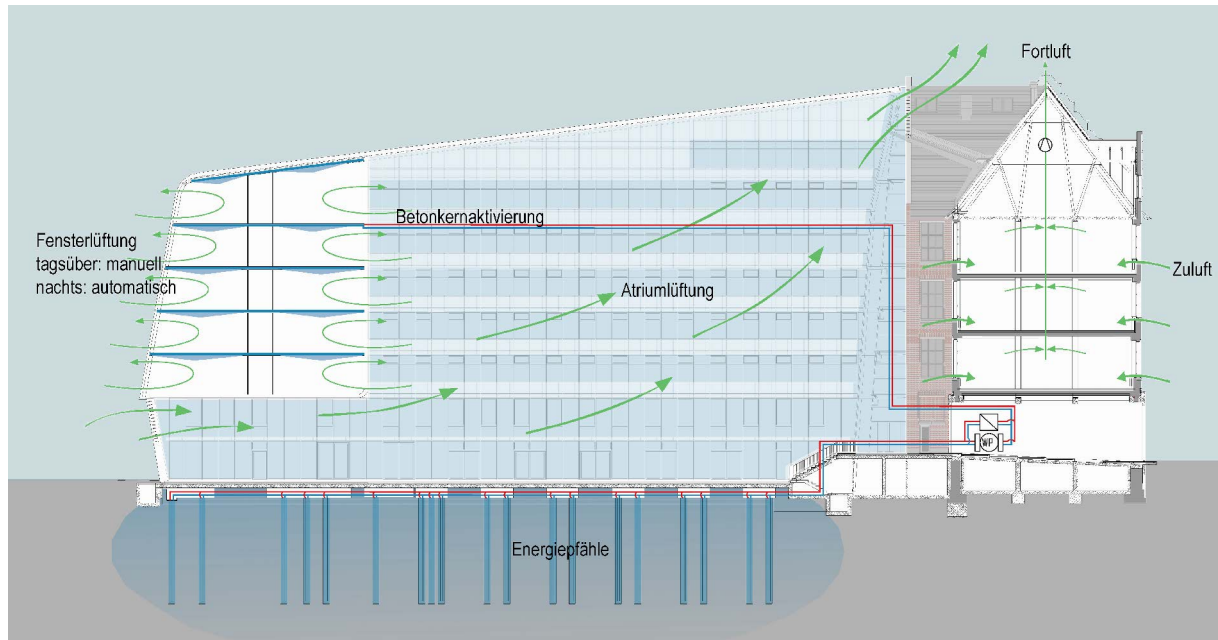
Das EnergieForum wurde im Sommer 2003 bezogen und bietet Produktions- und Dienstleistungsunternehmen, Firmenvertretungen, Institutionen und wissenschaftlichen Einrichtungen des Sektors der regenerativen Energien und der Umwelttechnik Gewerbe-, Geschäfts- und Seminarräume unter einem Dach. Der thematischen Zielsetzung des Gebäudes entsprechend, wurde unter besonderer Berücksichtigung der regenerativen und rationellen Energiewandlungstechnologien ein ganzheitliches Energiekonzept für ein Niedrigstenergiebürogebäude entwickelt. Das alte Magazingebäude wurde nach den Plänen des Architekturbüros Jentsch als Gebäudebestand denkmalgerecht instand gesetzt und ist beispielhaft für eine energie- und komfortgerechte Sanierung.

Im Rahmen der Arbeiten an diesem Projekt wurden die verschiedenen Komponenten des zu entwickelnden Energieversorgungssystems so aufeinander abgestimmt, dass bei einem möglichst geringen Energieverbrauch (Wärme  $<10 \text{ kWh}/(\text{m}^3\text{a})$ ; Strom  $<30 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ ) ein maximaler Grad an thermischer und visueller Behaglichkeit erreicht wurde. Um den innovativen Charakter des EnergieForums Berlin zu unterstreichen, kamen dabei Energieversorgungssysteme zum Einsatz, die das Labor kürzlich verlassen haben oder gerade zur Serienreife entwickelt wurden [Himmler]. Einen Gesamteindruck des Gebäudes vermittelt Bild 4.3.



**Bild 4.3: Luftaufnahme EnergieForum Berlin [Foto: Prof. Gockell; IGS TU Braunschweig]**

Ein zentraler Bestandteil des Gebäudes ist das mittig angeordnete Atrium, das natürlich be- und entlüftet wird, d.h. ohne Unterstützung raumluftechnischer Anlagen. Bild 4.4 zeigt die schematische Darstellung des Lüftungskonzeptes für den Sommerfall.



**Bild 4.4: Lüftungskonzept im Sommer**

Das Atrium liegt zwischen den beiden Gebäuderiegeln und hat eine Grundfläche von ca. 20 m x 59 m und ein Volumen von ca. 30730 m<sup>3</sup>. Im vorderen Teil des Atriums werden die Neubauflügel vom 2. bis zum 5. OG durch Brücken im Atrium miteinander verbunden (siehe Bild 4.5, mitte). Die Tragkonstruktion des Atriumsdaches besteht aus Stahlfachwerkbindern (Bild 4.5, rechts). Eine detaillierte Projektbeschreibung sowie die ausführliche Darstellung des Lüftungs- und Energiekonzeptes findet sich bei [Himmler].



**Bild 4.5: v. links n. rechts: Außenansicht Zuluftlamellen; Blick ins Atrium, Innenansicht Abluftlamellen**



Die zur Spree gewandte Zuluftöffnung des Atriums mit einem Brutto-Öffnungsquerschnitt von  $56,7 \text{ m}^2$  (4,8 % der Grundfläche) besteht aus einem Feld von drehbaren Lamellenflügeln ebenso wie die Abluftöffnung im senkrechten Dachübergangsbereich an das Magazingebäude mit einer Fläche von insgesamt  $70,3 \text{ m}^2$  (6 % der Grundfläche). Der Brutto-Öffnungsquerschnitt berechnet sich aus dem Produkt der lichten Breite und der lichten Höhe des Lamellenfeldes. Bild 4.6 zeigt die Lage der horizontal gelagerten Lamellenfelder, die über Steuerbefehle der Gebäudeleittechnik geöffnet oder geschlossen werden. Die Regelstrategien werden im folgenden Kapitel kurz beschrieben.

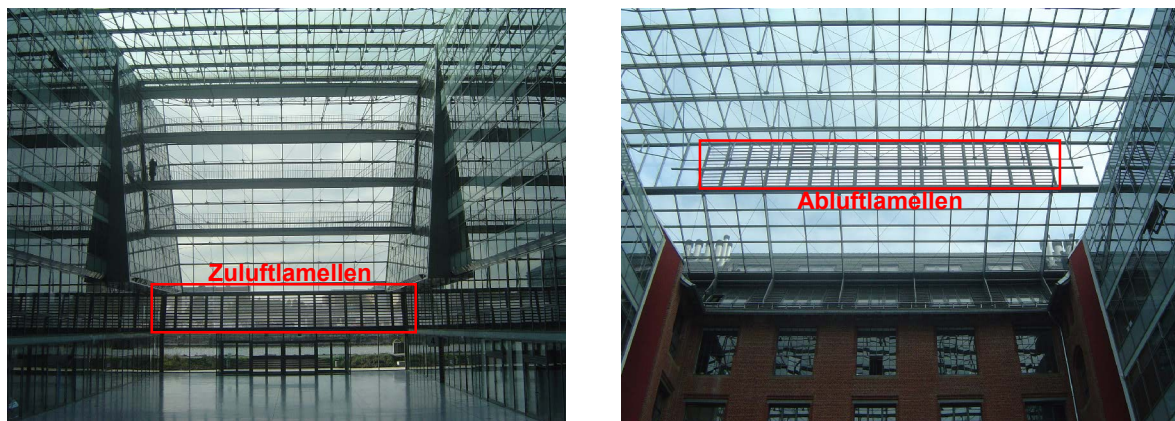


Bild 4.6: Blick ins Atrium; links: Blickrichtung Spree, Zuluftlamellen; rechts: Blickrichtung Magazingebäude, Abluftlamellen

#### 4.2 Regelstrategie Atriumlüftung

Die Raumlufttemperaturen zur Regelung des Atriums werden an den Atriumbrücken erfasst. Die Messstellen befinden sich mittig unterhalb der Atriumbrücken im 3., 4. und 5. OG sowie unterhalb der Atriumbrücke im 2.OG, ca. einen Meter von der Fassade des Ostflügels entfernt. Bild 4.7 zeigt links die Aufnahme eines Temperaturfühlers, in der Mitte den Fühler an der Brücke im 3. OG sowie rechts den Fühler an der Brücke im 2. OG.

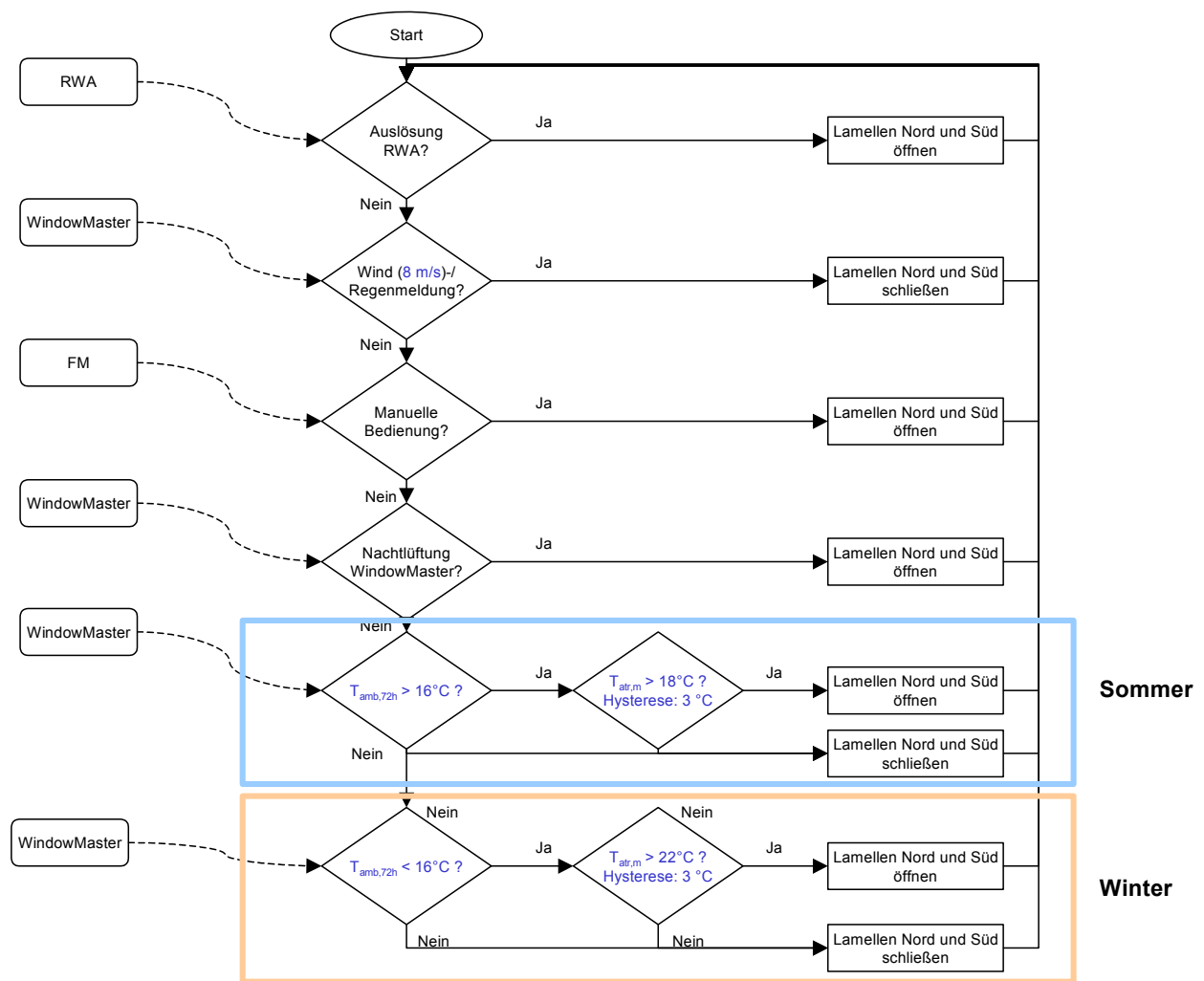


Bild 4.7: Temperaturfühler unter den Atriumbrücken

Im Sommerfall ( = gemittelte Außenlufttemperatur an 72 Stunden  $> 16^\circ\text{C}$ ) werden ab einer mittleren Atriumtemperatur  $> 18^\circ\text{C}$  die Lamellen geöffnet. Sinkt die gemittelte Atriumtemperatur unter  $15^\circ\text{C}$ , werden die Lamellen wieder geschlossen.

Im Winterfall ( = gemittelte Außenlufttemperatur an 72 Stunden  $< 16^\circ\text{C}$ ) werden ab einer mittleren Atriumtemperatur  $> 22^\circ\text{C}$  die Lamellen geöffnet. Sinkt die gemittelte Atriumtemperatur unter  $19^\circ\text{C}$ , werden die Lamellen wieder geschlossen.

Die Lamellensteuerung ist über den OPC-Server mit der Fenstersteuerung verbunden. Wird in einer der Bürozonen die Nachtlüftung ausgelöst, öffnen sich die Lamellen des Atriums, um eine Querlüftung der Büros zum Atrium zu ermöglichen. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, die automatische Steuerung der Lamellen manuell zu übersteuern. Bei Windstärken größer 8 m/s oder bei Regen werden die Lamellen automatisch geschlossen. Das zusammenfassende Regelschema für das Atrium zeigt Bild 4.8.



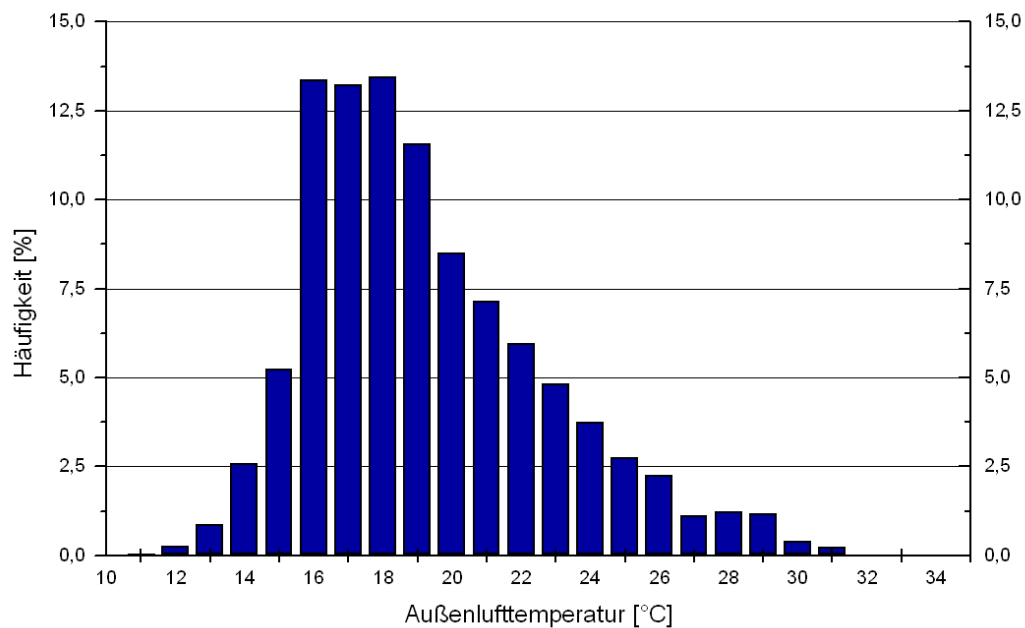
**Bild 4.8: Regelstrategie der Zu-/Abluftlamellen im Atrium [Himmler]**

Höchste Priorität bei der Lamellensteuerung hat die Entrauchungsfunktion. Wird diese ausgelöst, werden die Zu- und Abluftlamellen automatisch geöffnet (siehe Bild 4.8). Im Brandfall wird das Atrium des EnergieForums thermisch, d.h. über geeignete, natürlich wirkende Rauch- und Wärmeabzüge entraucht. Um die Funktionsfähigkeit dieses Konzeptes zu überprüfen, wurde eine Windkanalstudie zur Ermittlung der Druckbeiwerte auf der Gebäudeoberfläche durchgeführt (→ Kapitel 4.4). Die Ergebnisse dienten zur Bestimmung der Anordnung und Größe der Rauch- und Wärmabzugsöffnungen im Dachbereich sowie der Zuluftöffnungen im Fassadenbereich.

### 4.3 Raumlufttemperaturen im Atrium

Im Gegensatz zu normalen Aufenthaltsräumen (Büro, Wohnung) werden Atrien in den Wintermonaten nur minimal belüftet (Infiltration). Die Luftqualität ist aufgrund des großen Luftvolumens in den meisten Fällen zufriedenstellend und das Überschreiten einer Grenztemperatur tritt in der Regel nicht ein (siehe z.B. Bild 4.8: Lüftung im Winter erst bei Überschreitung einer Atriummitteltemperatur von 22°C). Eine Abschätzung des natürlichen Luftwechsels ist somit in den Wintermonaten nicht von Bedeutung, wenngleich hier die höchsten thermisch induzierten Luftwechsel zu erwarten wären.

Um den Einfluss eines möglichen thermisch induzierten Luftwechsels im Atrium zu bewerten, wurde anhand von Messdaten die Temperaturdifferenz zwischen der Atriumlufttemperatur (Mittelwert der Temperaturfühler) und der Außenlufttemperatur ausgewertet (Messdaten aus dem Jahr 2004). Im Sommer bzw. in der Übergangszeit werden die Atriumlamellen des EnergieForums erst bei Außenlufttemperaturen von im Mittel 16°C geöffnet (→ Bild 4.8). Bild 4.9 zeigt die prozentuale Verteilung der Außenlufttemperaturen, bei denen eine Atriumlüftung durch geöffnete Lamellen tatsächlich erfolgte. Außenlufttemperaturen < 14°C sind demnach für eine Abschätzung bzw. Bewertung des thermisch induzierten Innenraumluftwechsels unbedeutend.

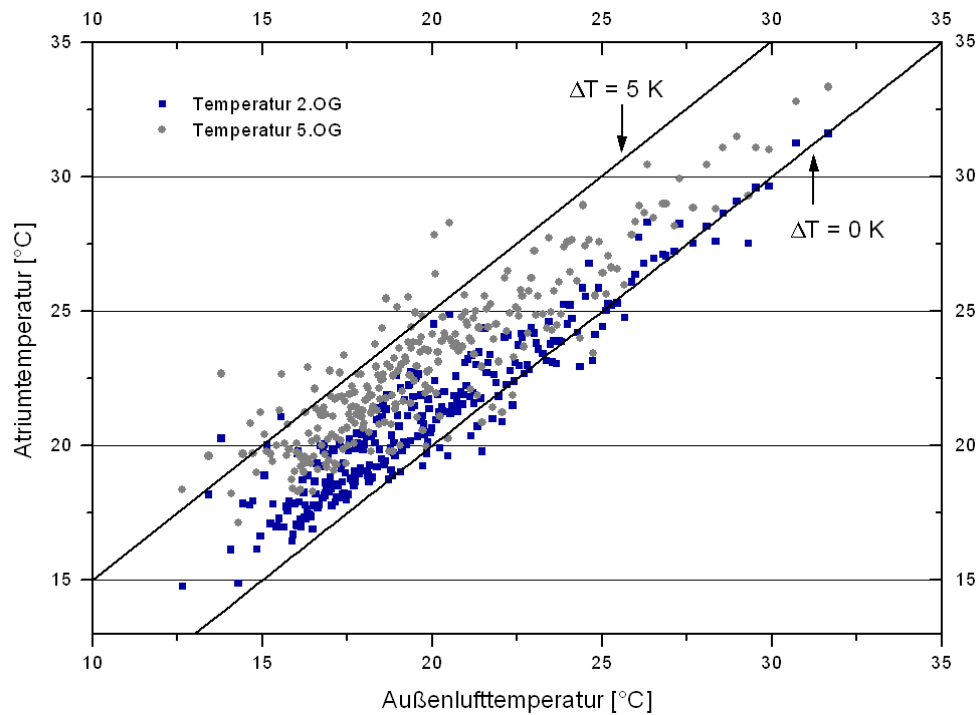


**Bild 4.9: Prozentuale Häufigkeit der Außenlufttemperatur in 1 K-Schritten in 2004 (Lamellen geöffnet)**

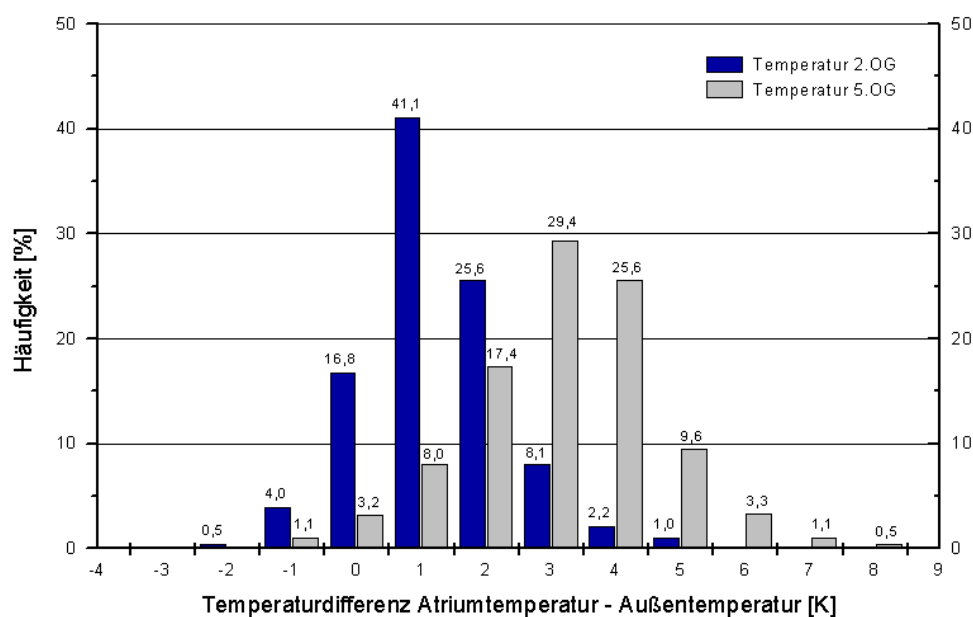
Außenlufttemperatur [°C]	<11,6	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
		11,6-12,5	12,6-13,5	13,6-14,5	14,6-15,5	15,6-16,5	16,6-17,5	17,6-18,5	18,6-19,5	19,6-20,5	20,6-21,5	21,6-22,5	22,6-23,5	23,6-24,5
Häufigkeit [%]	<1	0,3	0,9	2,6	5,2	13,4	13,2	13,5	11,6	8,5	7,1	6,0	4,8	3,8
Außenlufttemperatur [°C]	25	26	27	28	29	30	>30,5							
	24,6-25,5	25,6-26,5	26,6-27,5	27,6-28,5	28,6-29,5	29,6-30,5								
Häufigkeit [%]	2,8	2,3	1,1	1,2	1,2	0,4	<1							

**Tabelle 4.1: Prozentuale Häufigkeit der Außenlufttemperatur in 1 K-Schritten in 2004 (Lamellen geöffnet)**

Bild 4.10 zeigt die Raumlufttemperaturen im Atrium im 2. und 5.OG bei geöffneten Lamellen und die dazugehörige Außenlufttemperatur, die Lage der Messfühler zeigt Bild 4.12. Selbst im 5.OG, also im oberen Drittel des Atriums, beträgt die Temperaturdifferenz zur Außenlufttemperatur in ca. 94 % der Zeit nicht mehr als 5 K (siehe Bild 4.11). Die nach Formel 3.8 (→ Kapitel 3.4 BSM) zur Ermittlung des Innenraumluftwechsels maßgebliche *mittlere* Raumlufttemperatur (Mittelwert der Temperaturmessfühler) ist somit im Durchschnitt nur ca. 2 bis 3 K höher als die Außenlufttemperatur.



**Bild 4.10: Atriumtemperatur im 2. und 5.OG bei geöffneten Lamellen in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur ; Messwerte aus dem Jahr 2004**



**Bild 4.11: Prozentuale Häufigkeit der Temperaturdifferenz in 1 K-Schritten Atriumtemperatur im 2. und 5.OG bei geöffneten Lamellen – Außentemperatur**

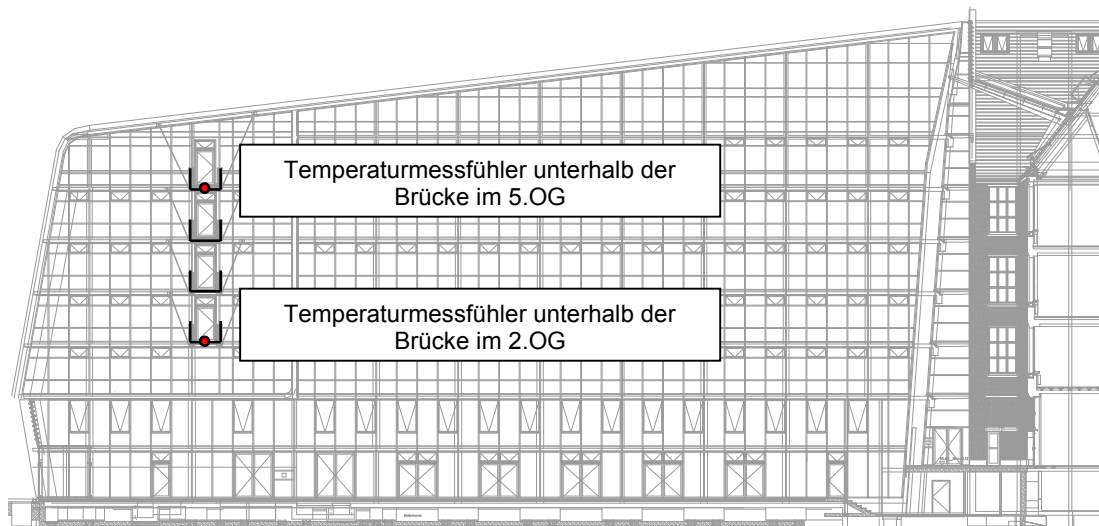


Bild 4.12: Schnitt durch das Atrium; Lage der Messfühler im 2. und 5. OG

Die relevante Temperaturdifferenz zur Abschätzung des Luftwechsels infolge von Auftriebseffekten liegt nach Auswertung der Messergebnisse in einem Bereich von 1 bis maximal 5 K.

Bei gleichem  $c_D$ -Wert für die Zu- und Abluftöffnung ergibt die Auswertung nach Formel 3.8 die im nachfolgenden Diagramm (Bild 4.13) dargestellten theoretischen Luftwechsel infolge von Auftriebseffekten (mittlere absolute Temperatur 293 bis 303 K).

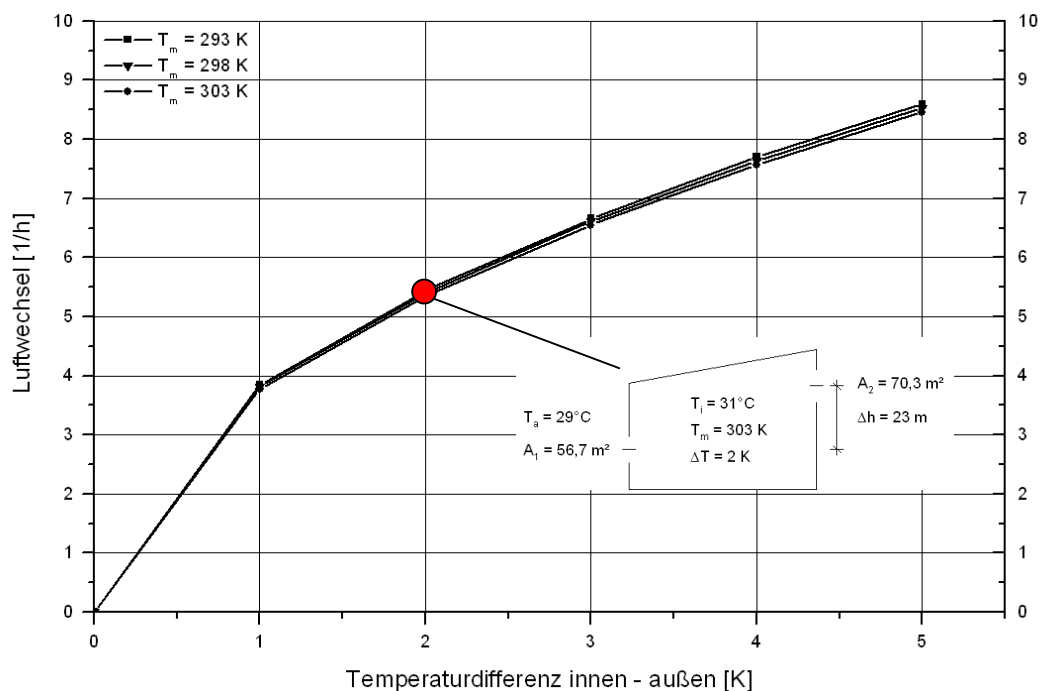
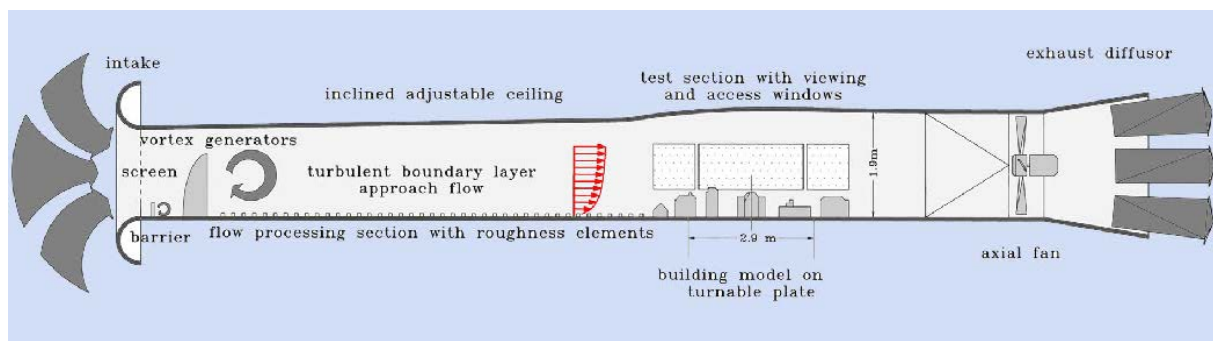


Bild 4.13: Berechneter Luftwechsel in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen innen und außen;  $c_D$ -Wert = 0,6

In der weitergehenden Betrachtung werden Luftwechseluntersuchungen unter verschiedenen meteorologischen Randbedingungen durchgeführt, um den Einfluss der Temperatur bzw. des Windes auf den Luftwechsel zu bewerten.

#### 4.4 Windkanalstudie EnergieForum Berlin

Zur Bestimmung der benötigten Druckbeiwerte wurde vor Baubeginn eine Windkanalstudie durchgeführt. Das vom Institut für Gebäude- und Solartechnik bereitgestellte Modell des EnergieForums wurde im Windkanal des Labors der Kessler + Luch GmbH Co. KG [K+L] untersucht. Der Kanal ist in „Eiffel“-scher Bauart errichtet, besitzt also eine geschlossene Messstrecke und einen offenen Luftkreislauf. Der Windkanal ist an einen Unterdruckraum angeflanscht, aus dem ein Ventilator Luft über den Windkanal absaugt. Die Strömungsgeschwindigkeit kann stufenlos durch Regelung des Ventilators eingestellt werden. Die Zuluft wurde durch den stromabwärts der Messstrecke angeordneten Axialventilator über einen Einlauf aus der umgebenden Halle angesaugt. Die versenkt eingelassene Drehscheibe mit 2,0 m Durchmesser trägt das Modell und kann entsprechend der zu untersuchenden Windrichtungen eingestellt werden. Um eine korrekte Wiedergabe der Verhältnisse an dem Original zu erhalten, wurde die für den Standort spezifische Höhenabhängigkeit von Turbulenz und Windgeschwindigkeit mittels stromaufwärts eingebauter Wirbelgeneratoren eingestellt. Da sich in der Grenzschicht ein Gleichgewichtszustand einstellen muss, ist eine genügend lange Anlaufstrecke erforderlich. Den prinzipiellen Aufbau eines Grenzschichtwindkanals in „Eiffel“-scher Bauart zeigt Bild 4.14.



**Bild 4.14: Atmosphärischer Grenzschichtwindkanal der ETH Zürich, Prinzip eines Windkanals in „Eiffel“-scher Bauart [GfA 2]**

Die Verzerrung des Geschwindigkeitsprofils wurde durch vorgelagerte Holzklötze erreicht, so dass die Anströmung des Modells weitgehend der Realität entspricht. Bei der vorliegenden sehr starken Verkleinerung (Maßstab 1:100) beschränken sich die strömungstechnischen Untersuchungen auf die grobe Gebäudestruktur. Das heißt, die durch Fassadendetails hervorgerufenen Strömungsbilder können in einem solch stark verkleinerten Maßstab nicht untersucht werden.

Um die Windlasten zu bestimmen wurde ein Modellkörper aus einem starren Material verwendet. Eine direkte Verformung des Modells wird dadurch verhindert. Über Druckmessbohrungen in der Modellwand wurde der außen anliegende Winddruck der Anströmung vermessen, der über Schläuche zum Messgerät geleitet wurde.



Für den als Modell aufgebauten Bereich mit dem geplanten Bauvorhaben und der umliegenden Bebauung am Stralauer Platz wurde die Geschwindigkeitsverteilung in Bodennähe mit einem Profilexponenten von  $\alpha = 0,31$  eingestellt.

Bild 4.15 zeigt das Windkanalmodell des EnergieForums (blauer Modellkörper) inkl. der geplanten umgebenden Bebauung. Die Lage der Messstellenanordnung ist aus Bild 4.16 ersichtlich.

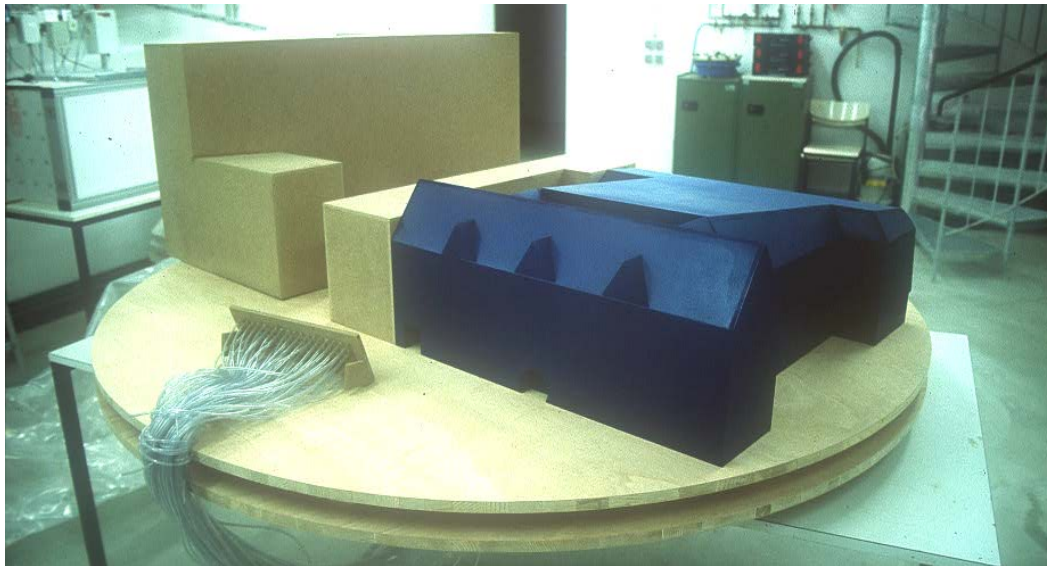


Bild 4.15: Modell mit Druckentnahmebohrungen im Maßstab 1:100

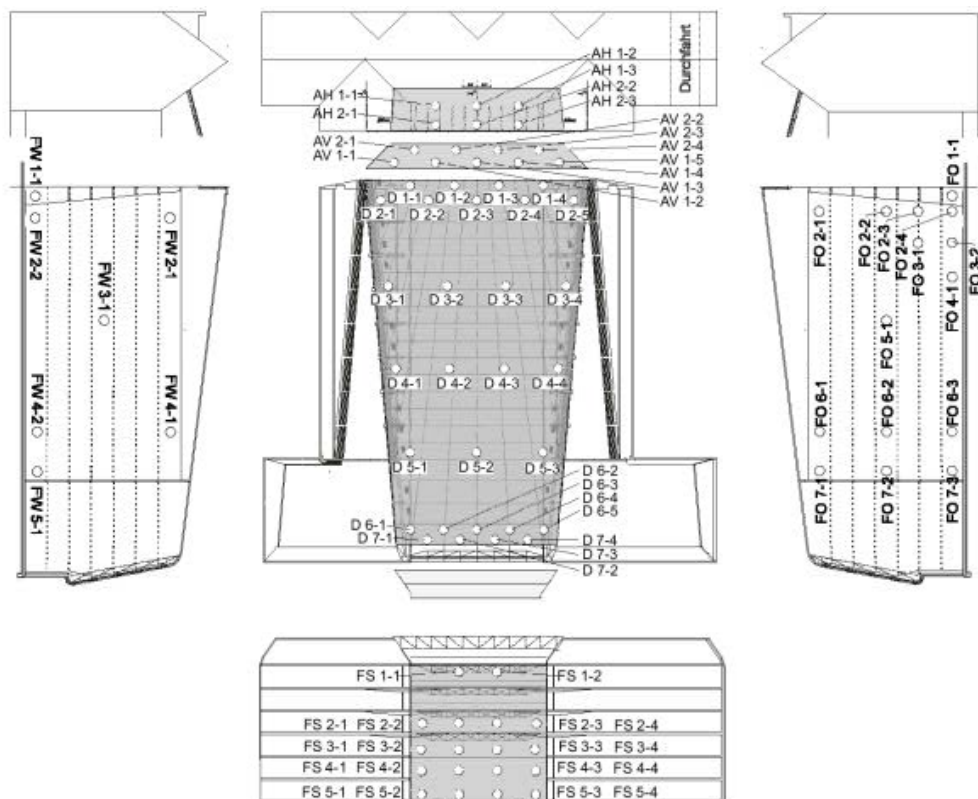


Bild 4.16: Lage und Bezeichnung der Druckmessstellen am Modell

Die am Modell ermittelten Druckbeiwerte berücksichtigen in der Regel nur die grobe Gebäudestruktur mit einer glatten Fassade. Öffnungen in der Fassade (z.B. Lamellenfenster, nach außen öffnende Rauch- und Wärmeabzüge) können allerdings abhängig von ihrer Gestaltung lokale Veränderungen des Strömungsbildes verursachen und die Druckbeiwerte unter Umständen erheblich beeinflussen. Beispielhaft sind in Bild 4.17 die Änderungen der Druckbeiwerte für zwei ausgewählte Punkte dargestellt, die sich bei geöffneter RWA in und entgegen der Windrichtung gegenüber dem geschlossenen Dach ergeben. Bei beiden Anströmrichtungen weichen die Druckbeiwerte z.T. erheblich von der Ausgangssituation ab [K+L].

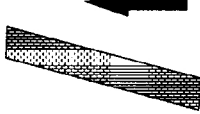
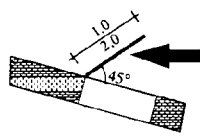
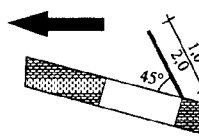
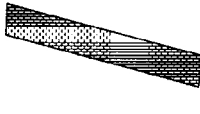
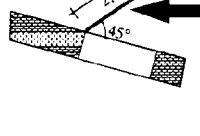
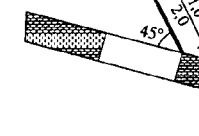
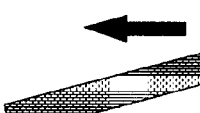
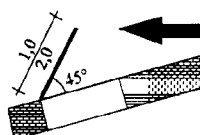
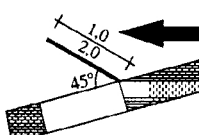
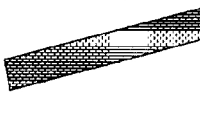
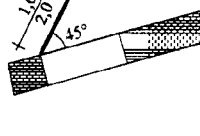
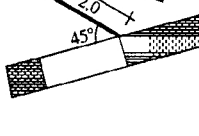
<b><math>c_p</math>-Werte an den Meßstellen D 3-3 und D 6-2</b>							
Windrichtung		ohne RWA (glattes Dach)		RWA Öffnung in Windrichtung		RWA Öffnung entgegen Windrichtung	
SW	D 3-3	-0,32		+0,44		-0,72	
	D 6-2	-1,32		-0,25		-1,58	
NO	D 3-3	-1,26		-1,42		-1,07	
	D 6-2	-0,85		-0,92		-0,82	

Bild 4.17: Änderung der Druckbeiwerte durch nach außen öffnende RWA-Klappen [K+L]

Die im Rahmen der Windkanaluntersuchung ermittelten  $c_p$ -Werte sind in den Tabellen B1 bis B8 für die acht Hauptwindrichtungen im Anhang B zusammengestellt. Diese Ergebnisse werden zur Validation der äußeren Randbedingungen für das Strömungssimulationsmodell herangezogen. Die Ermittlung der Druckbeiwerte wurde für einen geschlossenen Baukörper vorgenommen. In den nachfolgenden Untersuchungen soll überprüft werden, ob Druckbeiwerte, die an einem geschlossenen Baukörper ermittelt wurden, als Randbedingung zur Ermittlung des Innenraumluftwechsels geeignet sind, bzw. welche Fehler aus dieser Annahme resultieren.

## 5 Luftwechseluntersuchungen im Atrium

Tracergasversuche in einem normalen Raum, wie z.B. einem Büroraum, waren bereits Gegenstand umfangreicher Forschungsarbeiten [z.B. Maas; Hall]. In einem großvolumigen Atrium ist die Durchführung eines Tracergasversuches unter Umständen problematisch, da erhebliche Mengen an Tracergas mit dem Atriumluftvolumen vermischt werden müssen, um eine gleichmäßig verteilte Mindestkonzentration zu gewährleisten. Die Grenzen des Einsatzes von CO<sub>2</sub> als Tracergas wurden bereits bei einer Luftwechseluntersuchung im Atrium des Informatikzentrums der TU Braunschweig deutlich (Atriumvolumen ca. 8000 m<sup>3</sup>) [Zargari; Rozynski].

Bei den im Atrium des EnergieForums durchgeführten Luftwechseluntersuchungen wurde Schwefelhexafluorid als Tracergas verwendet, da es in der Außenluft nicht vorkommt und somit keine Hintergrundkonzentration in der Raum- bzw. Außenluft vorhanden ist. Hierdurch verringert sich die Menge des benötigten Tracergases. Das Luftvolumen beträgt hier mehr als 30000 m<sup>3</sup>. Um den Luftwechsel im Atrium zu bestimmen, wurden drei Tracergasversuche bei unterschiedlichen meteorologischen Randbedingungen durchgeführt:

- Messung im Winter bei großer Temperaturdifferenz und möglichst Windstille,
- Messung in der Übergangszeit bei hoher Windgeschwindigkeit und möglichst geringer Temperaturdifferenz,
- Messung im Sommer mit hohen Temperaturen und hoher Windgeschwindigkeit.

Langzeituntersuchungen sind aufgrund des hohen messtechnischen Aufwandes und der daraus resultierenden Kosten nicht durchführbar. Nachfolgend wird das verwendete Messsystem beschrieben.

### 5.1 Mess-System

Zur Erfassung der Gas-Konzentration wird ein Vivo TriGas Sensor in Kombination mit der Dosiereinheit Vivo Dosing der Fa. Dantec Dynamics eingesetzt. Die Versuchseinrichtung umfasst geeignete Komponenten zur Einbringung des Tracergases, zur Messgasentnahme, zur Messgasanalyse und zur Steuerung und Messwerterfassung.

Die **Vivo Dosiereinheit** für Tracergase ermöglicht eine genaue Gasdosierung über einen integrierten 2-Kanal Multiplexer. Das Kernstück der Dosiereinheit bildet ein Masseflusssensor (MFT, mass flow transducer), der die Tracergasmenge über einen weiten dynamischen Bereich präzise erfasst. Die Steuerung des Gasstroms in der Dosiereinheit erfolgt über mehrere Ventile. Die Genauigkeit der Dosierung beträgt 2% der dosierten Tracergasmenge im gesamten Anwendungsbereich. Der Eingangsdruck liegt zwischen 5 und 10 bar.

Die schematische Darstellung des Tracergasstroms innerhalb der Dosiereinheit zeigt Bild 5.1.

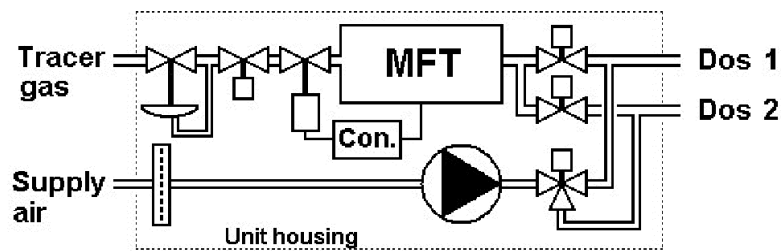


Bild 5.1: Schema des Tracergasstroms innerhalb der Dosiereinheit Vivo Dosing [Dantec]

Die **Vivo TriGas-Einheit** ist ausgestattet mit einem photoakustischen Gas Sensor. Die Lichtquelle (IR source) produziert breitbandiges IR-Licht. Auf dem Weg zur Messzelle passiert das Licht den Chopper (Schlitzscheibe) und optische Filter. Der Chopper ist eine sich drehende Schlitzscheibe, die das IR-Licht taktet. Durch die Unterteilung der Schlitzscheibe in drei Bereiche ergeben sich unterschiedliche Frequenzen. Die nachfolgenden optischen Filter lassen nur IR-Licht hindurch, welches von den zu messenden Gasarten absorbiert werden kann. Schließlich erreicht das IR-Licht die Messzelle. Das Prinzip der photoakustischen Spektroskopie sowie der Aufbau des Messstellenumschalters sind schematisch in Bild 5.2 dargestellt.

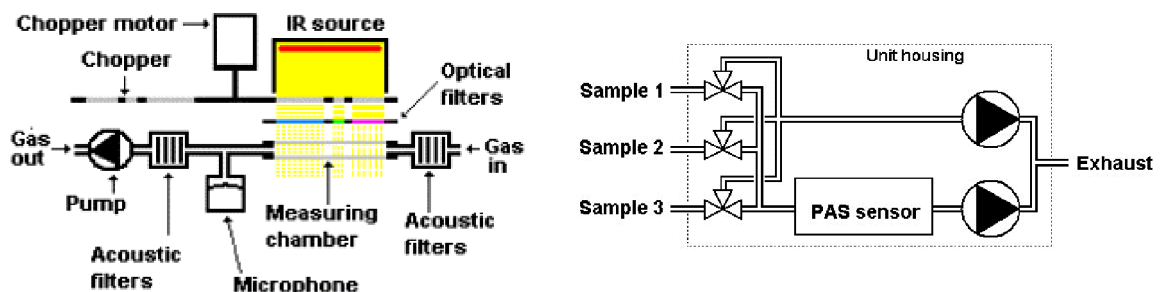


Bild 5.2: links: Photoakustische Spektroskopie; rechts: Messstellenumschalter des TriGas-Analysators

Bei Vorhandensein eines Tracergases wird das Licht absorbiert, wodurch sich das Gas erwärmt und ausdehnt. In einem geschlossenen System bewirkt die Ausdehnung einen Druckanstieg. Durch die Taktung des Lichtstrahls ergibt sich ein akustisches Signal. Das akustische Signal wird mit Hilfe eines Mikrofons detektiert. Der Zusammenhang zwischen Gaskonzentration und dem akustischen Signal wird bei der Kalibrierung bestimmt.

Das Messgas wird durch eine geräteinterne Messgaspumpe angesaugt. Die interne Pumpe der Vivo TriGas-Einheit transportiert die Proben über Entfernungen bis zu 50 m (bei Verwendung von Schläuchen mit einem Innendurchmesser von 2 mm). Der eingebaute Messstellenumschalter erlaubt die Probenentnahme an drei Positionen gleichzeitig.

Der Messstellenumschalter ist so ausgeführt, dass alle drei Entnahmestellen kontinuierlich abgesaugt werden. Der wesentliche Vorteil der Photoakustischen Spektroskopie ist die

niedrige Nachweisgrenze und die hohe Langzeitstabilität. Die Nachweisgrenze für  $\text{SF}_6$  liegt bei 0,04 ppm, der Messbereich zwischen 0,04 und 400 ppm. Weiterführende Informationen zum Messsystem sind in [Dantec] zu finden. Bild 5.3 zeigt die verwendeten Komponenten.

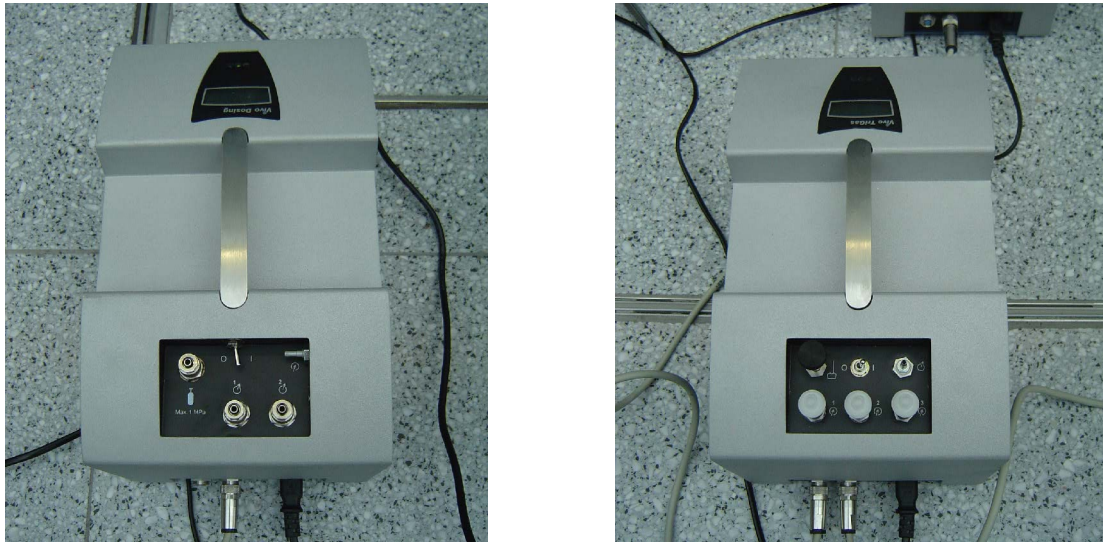


Bild 5.3: links: VIVO Dosiereinheit und rechts: TriGas-Einheit

## 5.2 Tracergas

Schwefelhexafluorid,  $\text{SF}_6$ , ist eine der wichtigsten Verbindungen zwischen Schwefel und einem Halogen. Es gehört zur Klasse der anorganischen Verbindungen.  $\text{SF}_6$  ist ein farbloses, geruchloses und sehr reaktionsträges Gas. Das Molekulargewicht beträgt 146,054 g/mol. Der Schmelzpunkt liegt bei  $-50,8^\circ\text{C}$ , der Sublimationspunkt bei  $-63,8^\circ\text{C}$ . Wegen seiner Struktur ist es sehr reaktionsträge und verhält sich chemisch wie ein Edelgas.

Das Schwefelatom wird von den 6 Fluoratomen fast kugelförmig umgeben und ist koordinativ gesättigt, d.h. es hat keine freien Elektronenpaare, an denen andere Moleküle angreifen könnten (siehe Bild 5.4).



Bild 5.4: Schematische Darstellung des Schwefelhexafluorid-Moleküls

Durch seinen regelmäßigen Bau ist das Schwefelhexafluorid-Molekül völlig unpolar. Dadurch haben polare Moleküle und Ionen keine Stelle, an der sie bevorzugt angreifen könnten. Schwefelhexafluorid ( $\text{SF}_6$ ) ist unter normalen Bedingungen ein absolut inertes Gas, das allerdings als Prozessgas im Plasma hoch reaktive Fluoratome und Schwefelfluorid-Radikale bildet und daher eines der aggressivsten Plasma-Prozessgase darstellt.



### 5.3 Durchführung der Luftwechseluntersuchungen

Die Untersuchungen im Januar und Mai wurden am Wochenende bzw. in den Abendstunden durchgeführt, um störende Einflüsse durch Publikumsverkehr weitgehend zu vermeiden. Im August wurde in der Mittagszeit bei hoher solarer Einstrahlung gemessen. Bei allen Messungen waren die Fenster der an das Atrium grenzenden Büroräume geschlossen. Ein Luftaustausch zwischen Büroräumen und Atrium kann somit ausgeschlossen werden. Die Betrachtung dieses Luftaustausches ist nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Der gesamte Messaufbau wurde innerhalb des Versuchsraumes (Atrium) verteilt. Die Dosiereinheit wird über eine Gasflasche mit Druckbegrenzer gleichmäßig mit  $\text{SF}_6$  versorgt. Zur Gasaufnahme wurden Schläuche mit einem Innendurchmesser von 2 mm und einer maximalen Länge von 50 m verwendet. Die Messungen wurden mit einem werksseitig kalibrierten TriGas-Sensor durchgeführt.

Die Dosier- und die TriGaseinheit wurden an einen Laptop angeschlossen, um den Verlauf der Messung parallel zur Durchführung zu kontrollieren. Die erfassten Daten wurden nach Abschluss der Untersuchungen ausgewertet.

Bild 5.5 zeigt den Messaufbau inkl. Tracergasflasche.



**Bild 5.5:** links: Messaufbau und rechts: Druckanzeige am Druckbegrenzer

Der Injektionsschlauch für das Tracergas wurde mittig an der Brücke im 2. OG befestigt. Die Injektion erfolgte auf Höhe der Zuluftlamellen, um das Tracergas möglichst gleichmäßig mit der Zuluft zu vermischen (siehe Bild 5.6).

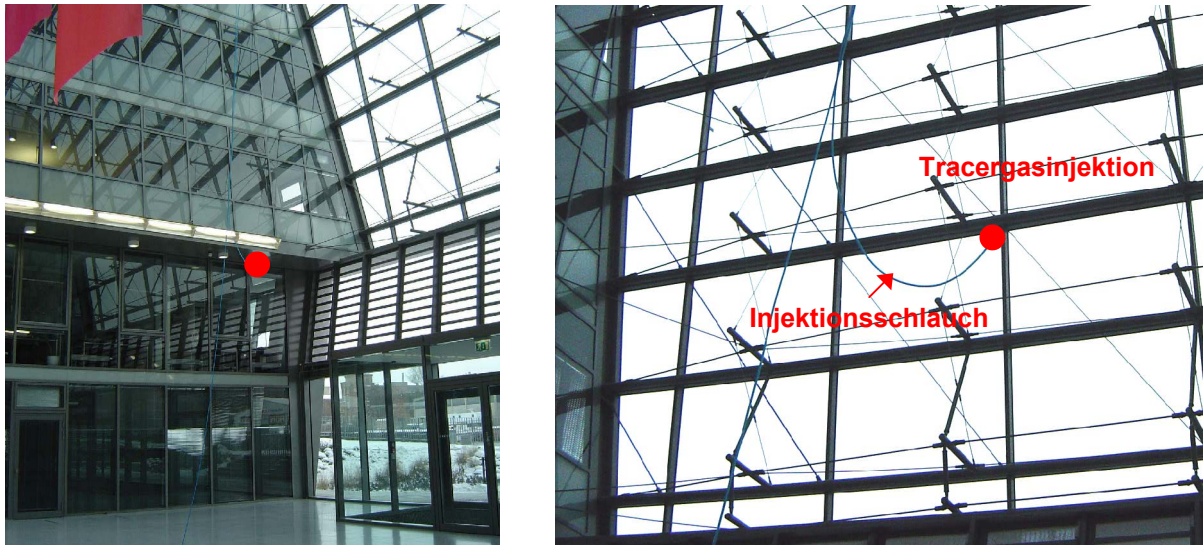


Bild 5.6: SF<sub>6</sub>-Injektion auf Höhe der Zuluftlamellen

Die Lage der Messpunkte ist schematisch in Bild 5.7 dargestellt.

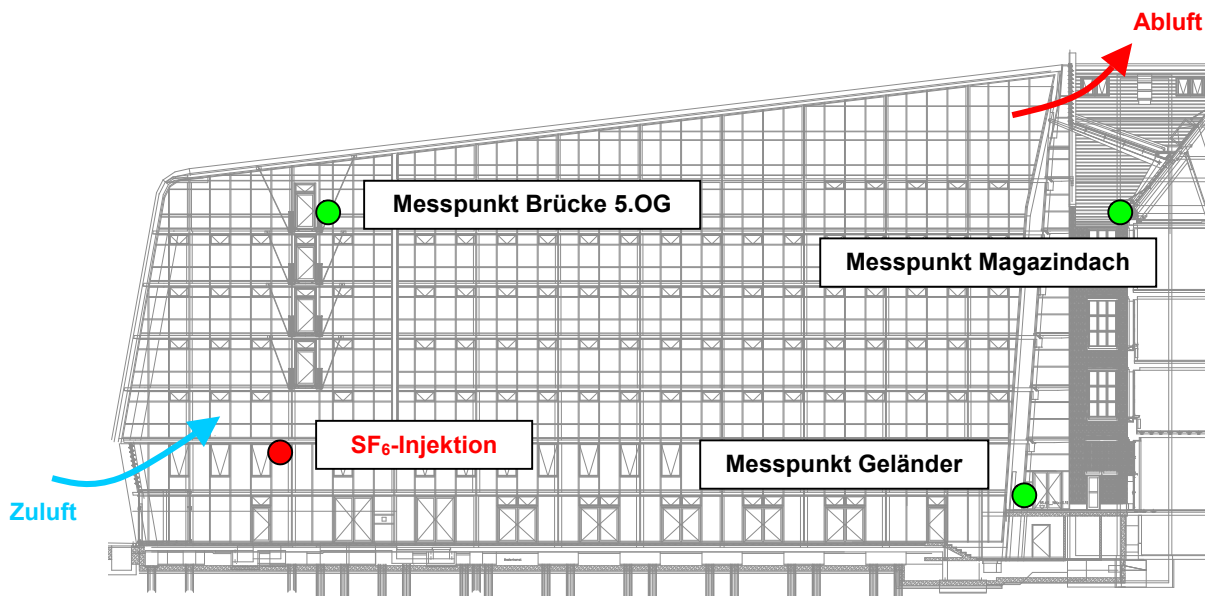


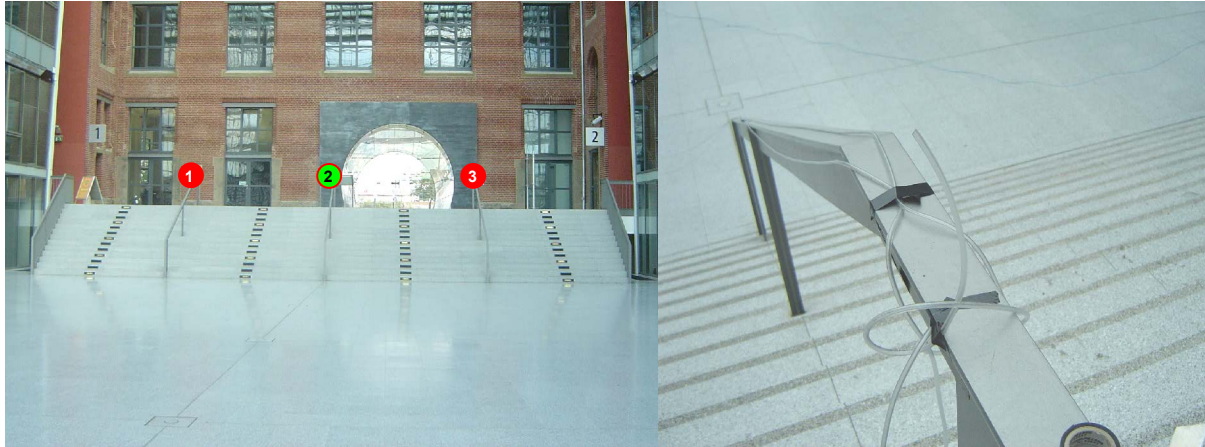
Bild 5.7: Längsschnitt durch das Atrium; Lage der Messpunkte

Untersucht wurden zu Beginn der Messung:

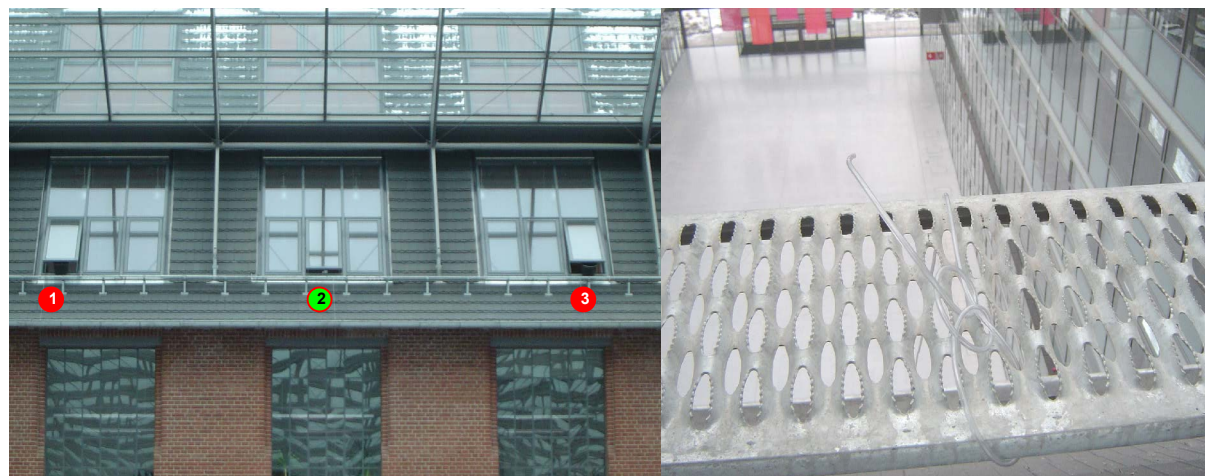
- drei Messpunkte an den Geländern der Atriumtreppe (Bild 5.8)
- drei Messpunkte im Traufbereich des Magazindaches (Bild 5.9)
- drei Messpunkte in der Mitte der Atriumbrücken im 2., 3. und 5. OG (Bild 5.10)

Im weiteren Verlauf wurde jeweils an Messpunkt Nr. 2 die Tracergaskonzentration erfasst.





**Bild 5.8: Messpunkte an den Geländern der Atriumtreppe P1-P3**



**Bild 5.9: Messpunkte im Traufbereich des Magazindaches P1-P3**



**Bild 5.10: Messpunkte an den Geländern der Atriumbrücken P1-P3**



### 5.3.1 Messung im Winter

Die Messung bei winterlichen Temperaturbedingungen wurde am 29.01.2005 durchgeführt (Samstag). Während des Abklingversuches lag die Außentemperatur bei  $-2,9^{\circ}\text{C}$  (siehe Bild 5.12). Es war ein schwach windiger Tag mit einer Windgeschwindigkeit von etwa  $1,5 \text{ m/s}$  mit leichten Böen aus west-/nordwestlicher Richtung (Bild 5.11; → Beaufort-Skala siehe Anhang D). Der Himmel war vollständig bedeckt. Die Wetterdaten wurden an der Wetterstation auf dem Dach des Energieforums erfasst.

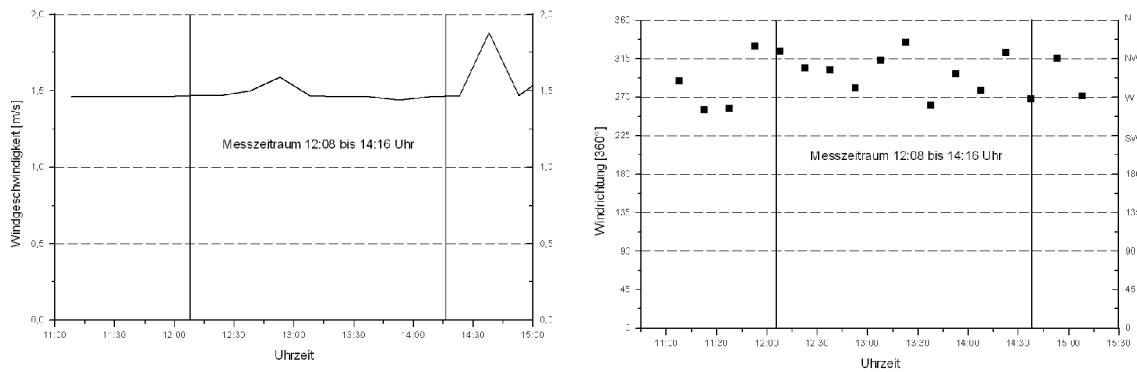


Bild 5.11: links: Windgeschwindigkeit; rechts: Windrichtung

Die Zu- und Abluftlamellen im Atrium werden über Steuerungsbefehle der Gebäudeleittechnik geöffnet und geschlossen. Da die Lamellen in den Wintermonaten normalerweise geschlossen sind, wurde im Rahmen des Versuches die manuelle Übersteuerung aktiviert. Die manuell ausgelösten Öffnungs- und Schließvorgänge der Lamellen sind in Bild 5.12 als Ylam, süd für die Zuluft und Ylam, nord für die Abluft gekennzeichnet und dargestellt. Den Temperaturverlauf an den Messstellen (→ Bild 4.7) zeigt Bild 5.12.

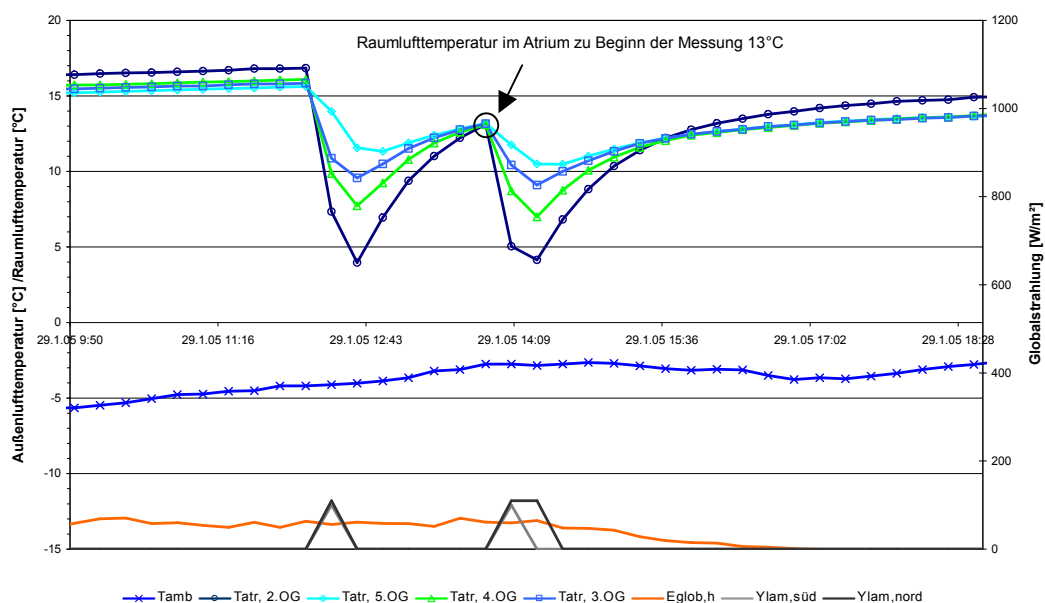
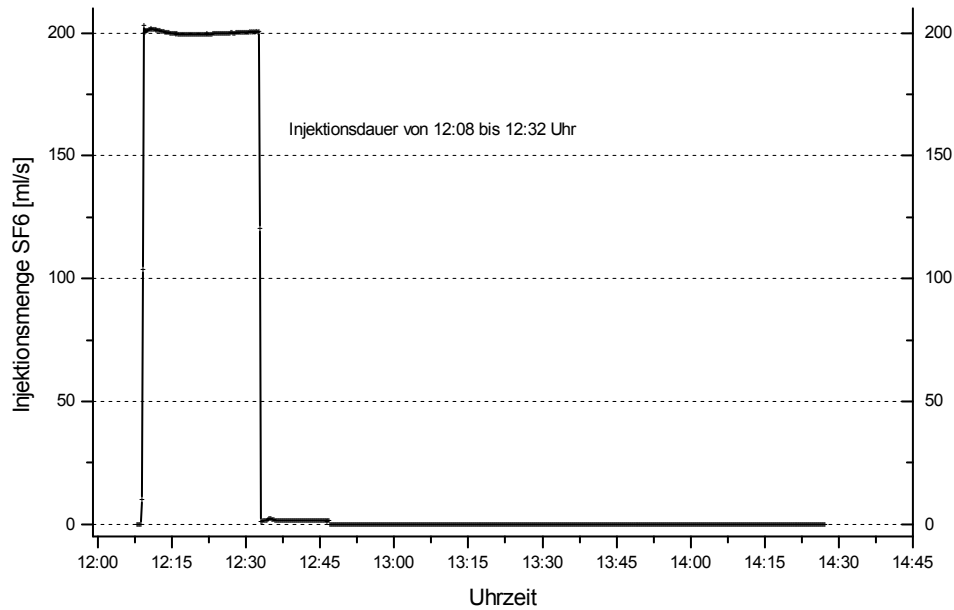


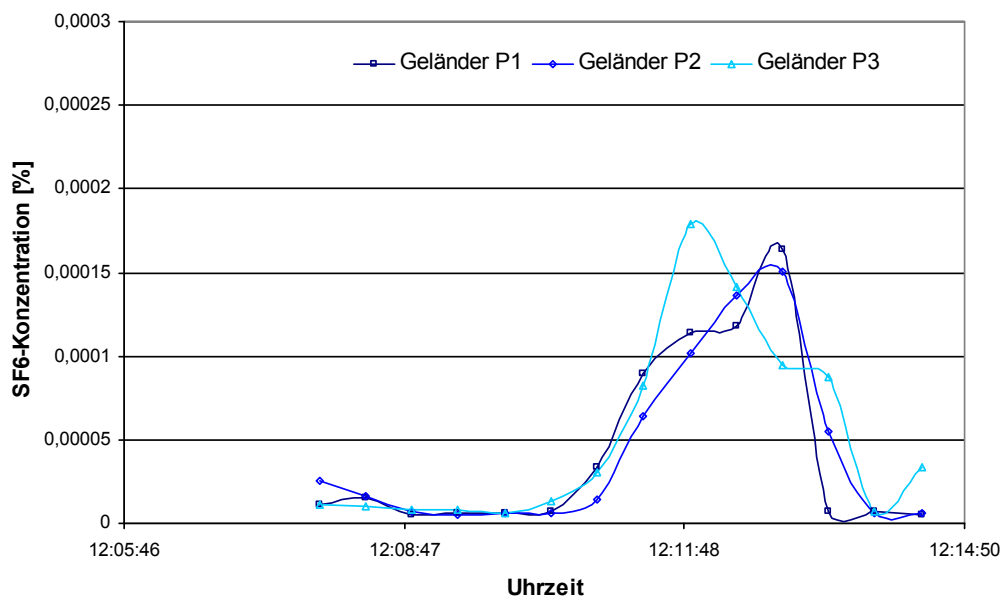
Bild 5.12: Raumlufttemperaturverlauf im Atrium während der Messung

Über einen Zeitraum von 22 Minuten wurde dem Atriumvolumen eine konstante Injektionsmenge von 200 ml/s SF<sub>6</sub> als Tracergas zugeführt (siehe Bild 5.13). Nach Beginn der Injektion wurde bei geöffneten Zu- und Abluftlamellen die Konzentration des Tracergases an den Messpunkten P1 bis P3 nacheinander an den unterschiedlichen Positionen erfasst.

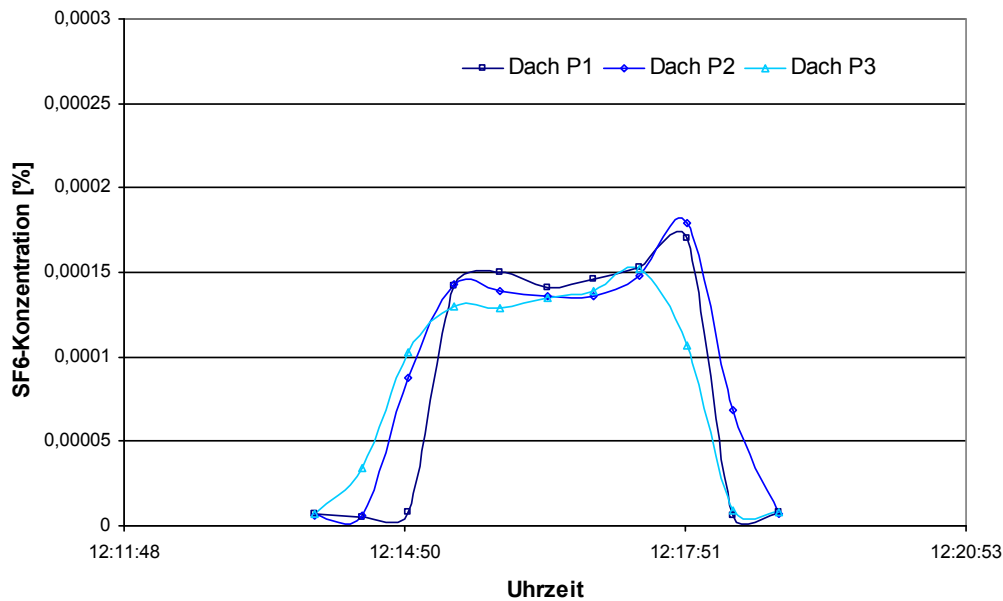


**Bild 5.13: Zeitlicher Verlauf der SF<sub>6</sub>-Injektion**

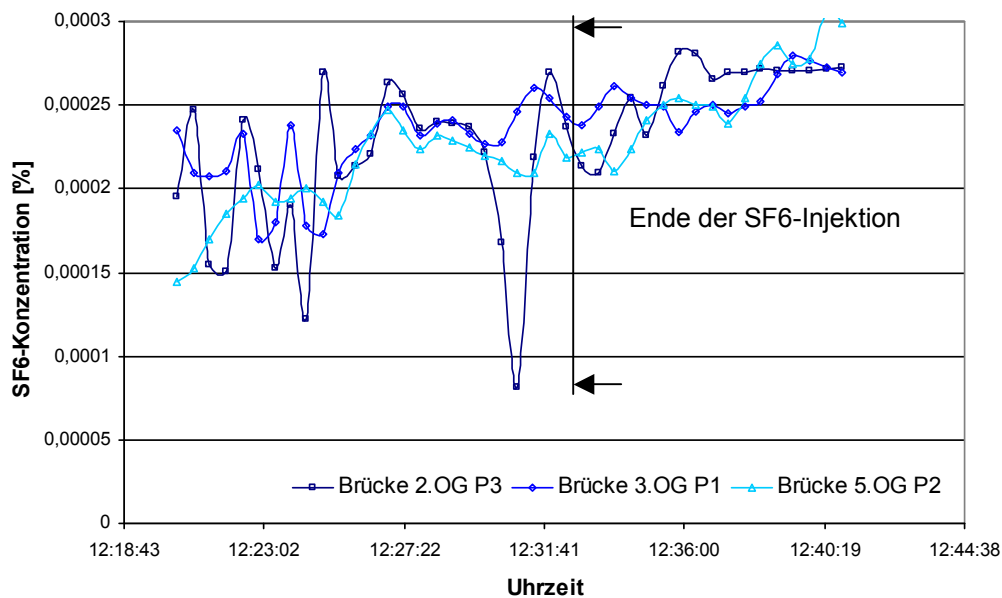
Die Bilder 5.14 bis 5.16 zeigen den Konzentrationsverlauf an den gewählten Messpunkten während der Injektion. Bereits hier zeigt sich, dass eine sehr gleichmäßige Verteilung des Tracergases erfolgt, da die Konzentration an allen Punkten gleichmäßig ansteigt bzw. sinkt.



**Bild 5.14: Konzentrationsverlauf an den Messpunkten Treppengeländer**



**Bild 5.15: Konzentrationsverlauf an den Messpunkten Magazindach**

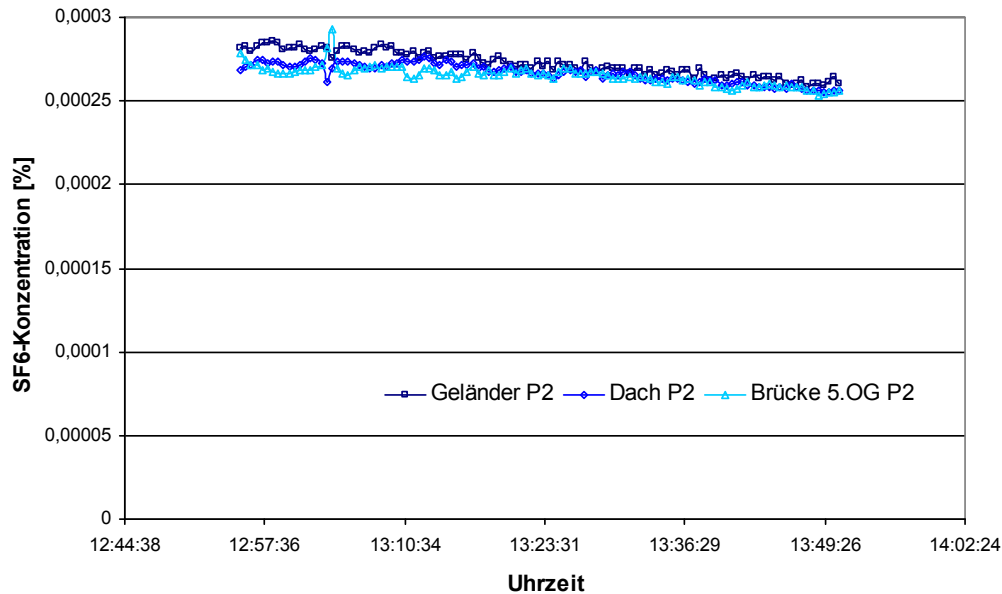


**Bild 5.16: Konzentrationsverlauf an den Messpunkten Atriumbrücken**

Die  $\text{SF}_6$ -Injektion wurde um 12:32 Uhr beendet. Daraufhin wurden die Zu- und Abluftlamellen geschlossen. Im Rahmen des Versuches wurde nun der Luftwechsel infolge von Infiltration bestimmt ( $\rightarrow$  Konzentrationsabfall-Methode). Hierzu wurde jeweils an Messpunkt P2 die Tracergaskonzentration bei geschlossenen Zu- und Abluftlamellen gemessen. Die gewählten Messpunkte sind in den Bildern 5.8 bis 5.10 dargestellt.

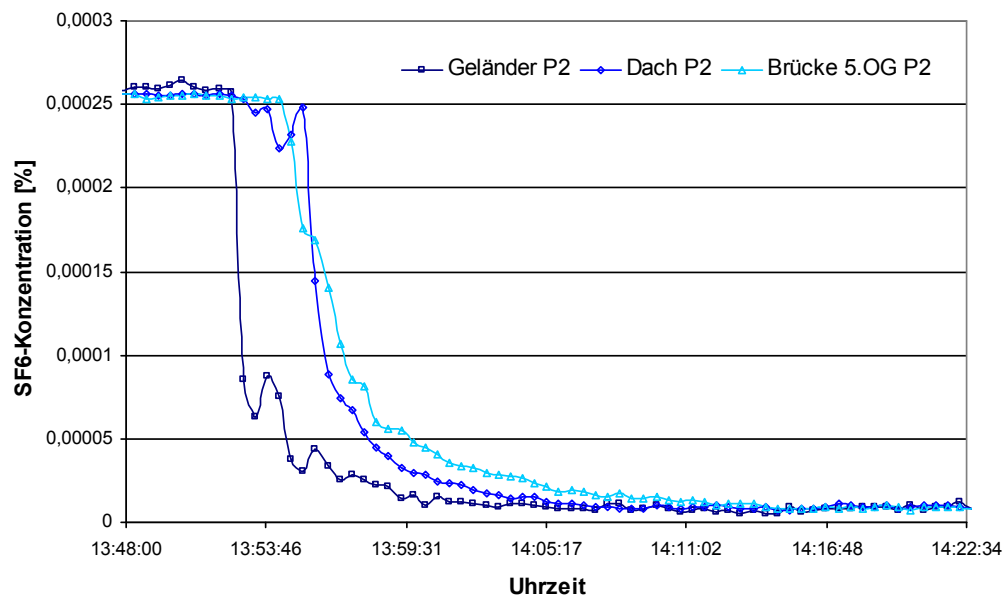
Die  $\text{SF}_6$ -Konzentration bei geschlossenen Lamellen ist an allen Messpunkten während der gesamten Messdauer (ca. eine Stunde) sehr gleichmäßig, so dass eine vollständige Durchmischung des Tracergases mit der Raumluft vorausgesetzt werden kann.

Die Konzentrationsabnahme bei geschlossenen Lamellen zeigt Bild 5.17. Der Lufteintrag infolge von Undichtheiten beträgt  $0,10 \text{ h}^{-1}$ .



**Bild 5.17: Konzentrationsverlauf an ausgewählten Messpunkten bei geschlossenen Lamellen  
→ Konzentrationsabbau infolge von Infiltration**

Im Zuge der weiteren Versuchsdurchführung wurden die Zu- und Abluftlamellen geöffnet, um den Luftwechsel bei Fensterlüftung zu bestimmen. Der aus der Konzentrationsabnahme resultierende Luftwechsel wird mit Hilfe der Konzentrationsabfall-Methode und aus der Berechnung der nominalen Zeitkonstante bestimmt. Bild 5.18 zeigt den Konzentrationsverlauf während der Konzentrationsabnahme.



**Bild 5.18: Konzentrationsverlauf an ausgewählten Messpunkten bei geöffneten Lamellen**

Da die Luftwechselzahl nur indirekt aus den zeitlichen Konzentrationsverteilungen berechnet werden kann, ist bei der subjektiven Wahl des Anfangswertes aus der Konzentrationsabfallkurve mit großer Sorgfalt vorzugehen.

Nach dem Öffnen der Lamellen nimmt die Temperatur im Atrium schlagartig ab. Sie sinkt während des Versuches von 13°C auf ca. 8 bis 7°C (hierbei handelt es sich um die Angabe eines Mittelwertes, der Min.-Wert beträgt: 4°C im 2.OG), d.h. die für den Luftwechsel maßgebliche Temperaturdifferenz sinkt von 16 K auf 11 bis 10 K. Erwartungsgemäß verringert sich der Luftwechsel infolge der abnehmenden Temperaturdifferenz während der Konzentrationsabnahme von 11,5 auf 9,0 h<sup>-1</sup> (am Magazindach). In Tabelle 5.1 und 5.2 sind die an den untersuchten Punkten berechneten Luftwechsel dargestellt. Der Luftwechsel wird aus zwei Wertepaaren der Anfangs- und Endkonzentration für zwei Zeitpunkte berechnet.

Luftwechsel nach:	Geländer	Magazindach	Brücke 5.OG
	[1/h]	[1/h]	[1/h]
18 Minuten (0,3 h)	12,1	11,5	10,5
24 Minuten (0,4 h)	9,5	9,0	8,7

**Tabelle 5.1: Luftwechsel nach der Konzentrationsabfall-Methode**

Der lokale Luftaustausch kann, wie in Kapitel 3.4 beschrieben, auch durch die Berechnung der nominalen Zeitkonstante ermittelt werden. Aus der nominalen Zeitkonstante an der Abluftöffnung kann der mittlere Luftwechsel für das gesamte Raumvolumen bestimmt werden. Der Messwert am Magazindach in der Nähe der Abluftöffnung liefert somit näherungsweise das Ergebnis für den Gesamtluftwechsel. Bei diesem Auswerteverfahren sinkt der Luftwechsel während des Auswertzeitraums von 10,9 auf 10,5 h<sup>-1</sup>.

Luftwechsel nach:	Geländer	Magazindach	Brücke 5.OG
	[1/h]	[1/h]	[1/h]
18 Minuten (0,3 h)	11,8	10,9	9,5
24 Minuten (0,4 h)	11,5	10,5	9,2

**Tabelle 5.2: Luftwechsel berechnet aus der nominalen Zeitkonstante**

### 5.3.2 Messung in der Übergangszeit

Am 20.05.2005 (Freitag) wurde die Luftwechseluntersuchung am frühen Abend durchgeführt. Dazu wurde jeweils an Messpunkt P2 die Tracergaskonzentration erfasst. Die gewählten Messpunkte sind in den Bildern 5.8 bis 5.10 gekennzeichnet.

Es wehte eine leichte bis schwache Brise mit einer Windgeschwindigkeit von 2 bis 3 m/s mit leichten Böen aus süd-/südöstlicher Richtung bei heiterem Himmel.

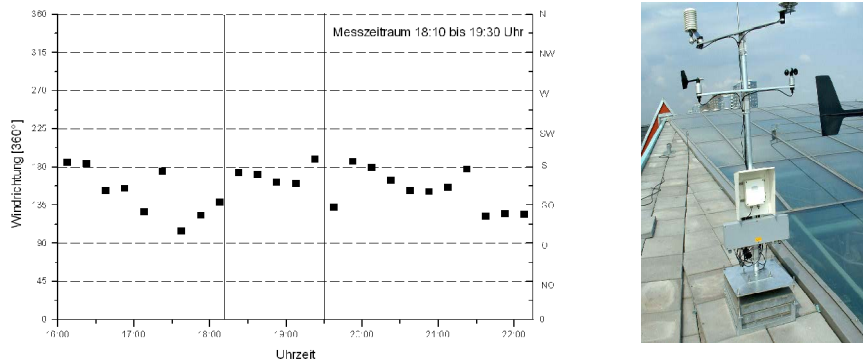


Bild 5.19: links: Windrichtung; rechts Wetterstation

Die Windrichtung wurde an der Wetterstation auf dem Dach des Energieforums erfasst. Die Windgeschwindigkeit wurde mit Hilfe eines Hitzdrahtanemometers gemessen, da der entsprechende Wert an der Wetterstation während der Messung nicht verfügbar war.

Die manuell ausgelösten Öffnungs- und Schließvorgänge der Lamellen sind in Bild 5.20 als Ylam, süd für die Zuluft und Ylam, nord für die Abluft gekennzeichnet und dargestellt. Den Temperaturverlauf an den Messstellen zeigt Bild 5.20. Die Zu- und Abluftlamellen waren tagsüber durchgehend geöffnet und wurden nur während der Tracergasinjektion kurzzeitig manuell geschlossen. Die Außentemperatur lag während der Versuchsdauer bei konstant 20°C.

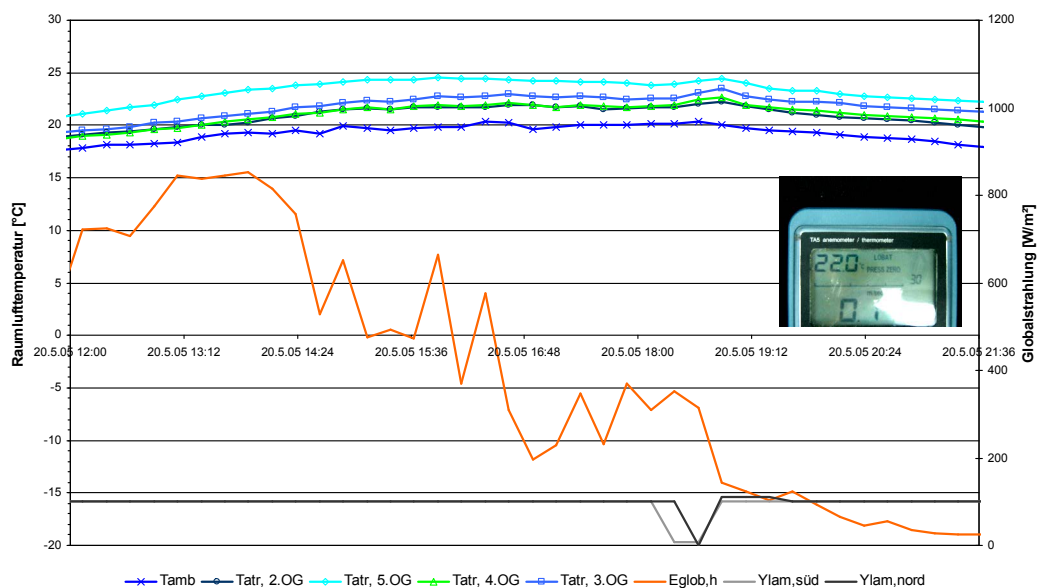
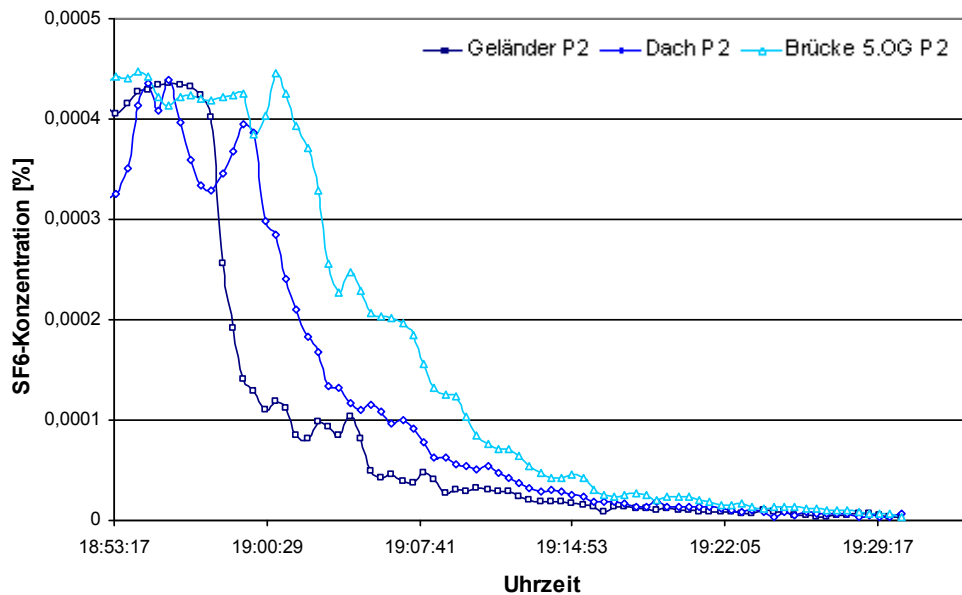


Bild 5.20: Raumlufthtemperaturverlauf im Atrium während der Messung; Foto: Temperaturmessung im Atrium

Bild 5.21 zeigt den Konzentrationsverlauf an den Messpunkten während der Konzentrationsabnahme.



**Bild 5.21: Konzentrationsverlauf an ausgewählten Messpunkten bei geöffneten Lamellen**

Der aus der Konzentrationsabnahme resultierende Luftwechsel wird mit der Konzentrationsabfall-Methode und aus der Berechnung der nominalen Zeitkonstante bestimmt. In Tabelle 5.3 und 5.4 sind die an den untersuchten Punkten berechneten Luftwechsel dargestellt. Im Gegensatz zum temperaturinduzierten Luftwechsel im Winter stellt sich ein konstanter Luftwechsel ein.

Geländer [1/h]	Magazindach [1/h]	Brücke 5.OG [1/h]
6,6	6,6	5,1

**Tabelle 5.3: Luftwechsel nach der Konzentrationsabfall-Methode**

Das Ergebnis der Berechnung des Luftaustausches aus der nominalen Zeitkonstante stimmt gut mit der Berechnung nach der Konzentrationsabfall-Methode überein. Beide Rechenverfahren ergeben einen 6,5 bis 6,6-fachen Luftwechsel am Geländer der Atriumtreppe und am Magazindach. Im Bereich der Brücke im 5.OG ist der Luftwechsel mit 5,0 bis 5,1  $\text{h}^{-1}$  etwa 23 % geringer.

Geländer [1/h]	Magazindach [1/h]	Brücke 5.OG [1/h]
6,5	6,6	5,0

**Tabelle 5.4: Luftwechsel berechnet aus der nominalen Zeitkonstante**

Durch die geringe Temperaturdifferenz zwischen Außenluft und Atriumtemperatur ist der ermittelte Luftwechsel nahezu vollständig auf den Windeinfluss zurückzuführen.

### 5.3.3 Messung im Sommer

Am 31.08.2005 (Mittwoch) wurde die Luftwechseluntersuchung in der Mittagszeit bei voller solarer Einstrahlung durchgeführt. Dazu wurde jeweils an Messpunkt P2 die Tracergaskonzentration erfasst. Die gewählten Messpunkte sind in den Bildern 5.8 bis 5.10 gekennzeichnet. Es wehte eine leichte bis schwache Brise mit einer Windgeschwindigkeit von 2 bis 3 m/s bei Hauptwindrichtung Ost mit leichten Böen aus südlicher Richtung bei sonnigem Himmel.

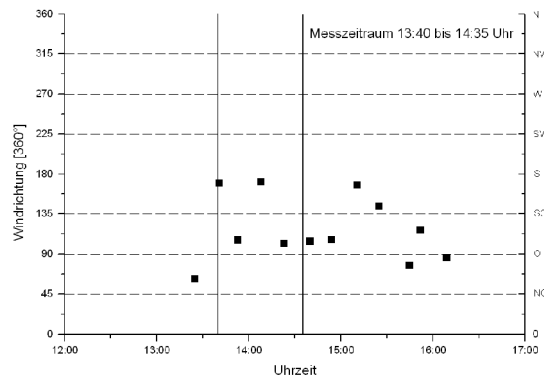


Bild 5.22: Windrichtung

Die Windrichtung wurde an der Wetterstation auf dem Dach des Energieforums erfasst. Die Windgeschwindigkeit wurde mit Hilfe eines Hitzdrahtanemometers gemessen, da der entsprechende Wert an der Wetterstation während der Messung nicht verfügbar war.

Die manuell ausgelösten Öffnungs- und Schließvorgänge der Lamellen sind in Bild 5.23 als Ylam, süd für die Zuluft und Ylam, nord für die Abluft gekennzeichnet und dargestellt. Den Temperaturverlauf an den Messstellen zeigt Bild 5.23. Die Zu- und Abluftlamellen waren tagsüber durchgehend geöffnet und wurden nur während der Tracergasinjektion kurzzeitig manuell geschlossen. Die Außentemperatur lag während der Versuchsdauer bei etwa 25°C.

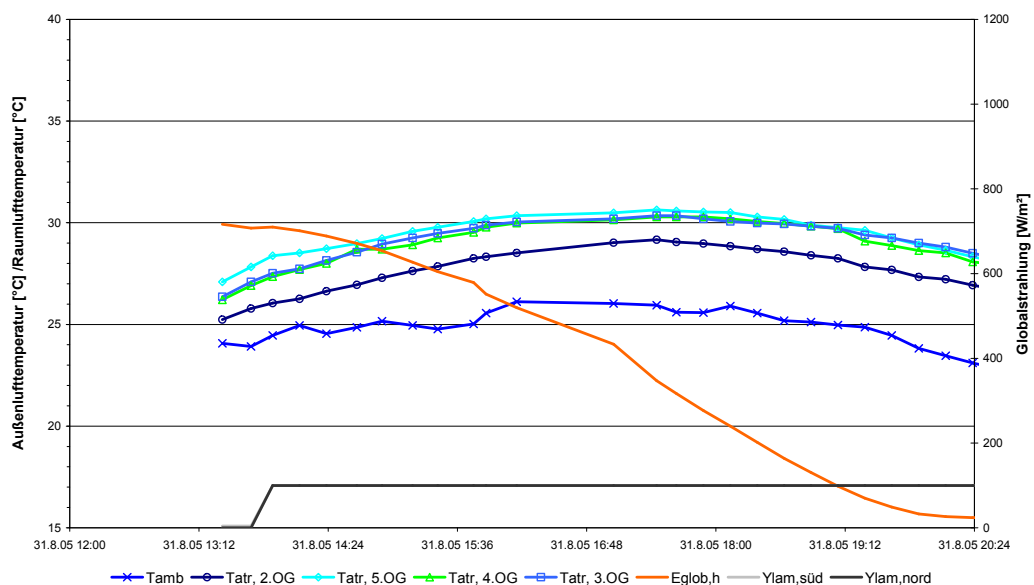


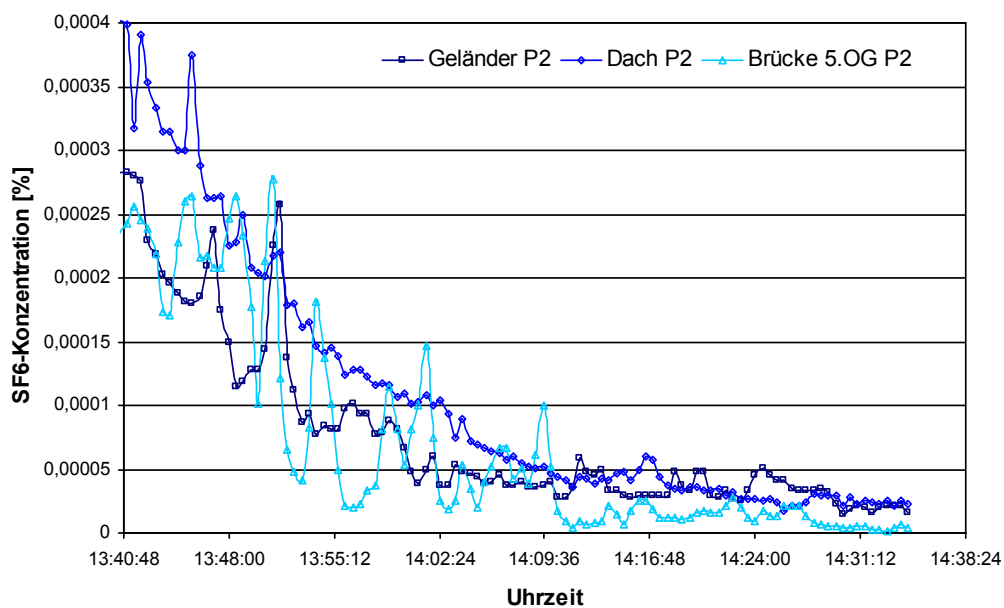
Bild 5.23: Raumlufttemperaturverlauf im Atrium während der Messung



Aufgrund eines Messdatenausfalls liegen die Daten erst ab 13:20 Uhr vor. Die für die Versuchsdauer relevanten Daten von 13:40 bis 14:35 Uhr sind vorhanden.

Die Temperaturfühler an den Brücken im 3., 4. und 5. OG sind mittig unterhalb der Brücken angeordnet; sie zeigen alle ein ähnliches Temperaturverhalten. Der Fühler an der Brücke im 2. OG ist im Abstand von 1 m von der Fassade angebracht. Insgesamt ist die Mitteltemperatur im Atrium etwa 3 bis 4 K höher als die Außenlufttemperatur. Der Luftwechsel kann somit sowohl durch den Wind als auch durch die Temperaturdifferenz induziert werden.

Bild 5.24 zeigt den Konzentrationsverlauf während der Konzentrationsabnahme. Die starken Schwankungen im Bereich der Brücke im 5.OG sind vermutlich auf thermisch verursachte Verwirbelungen aufgrund der direkten Sonneneinstrahlung zurückzuführen. Das Ergebnis der Luftwechselberechnung an dieser Stelle wird in der weiteren Betrachtung vernachlässigt.



**Bild 5.24: Konzentrationsverlauf an ausgewählten Messpunkten bei geöffneten Lamellen**

Der aus der Konzentrationsabnahme resultierende Luftwechsel wird mit der Konzentrationsabfall-Methode und aus der Berechnung der nominalen Zeitkonstante bestimmt. In Tabelle 5.5 und 5.6 sind die an den untersuchten Punkten berechneten Luftwechsel dargestellt. Am Geländer der Atriumtreppe und am Magazindach stellt sich ein gleichmäßiger Luftwechsel während des Auswertzeitraums ein.

Geländer [1/h]	Magazindach [1/h]	Brücke 5.OG [1/h]
3,4	3,3	(4,8)

**Tabelle 5.5: Luftwechsel nach der Konzentrationsabfall-Methode**

Das Ergebnis der Berechnung des Luftaustausches aus der nominalen Zeitkonstante stimmt gut mit der Berechnung nach der Konzentrationsabfall-Methode überein. Gegen Ende des Abklingversuches liefern beide Verfahren einen Gesamtraumluftwechsel von 3,3 bis 3,4 h<sup>-1</sup>.

Geländer [1/h]	Magazindach [1/h]	Brücke 5.OG [1/h]
3,4	3,4	(3,7)

Tabelle 5.6: Luftwechsel berechnet aus der nominalen Zeitkonstante

### 5.3.4 Zusammenfassung der Ergebnisse der Luftwechseluntersuchungen

In Tabelle 5.7 sind die Ergebnisse aller Luftwechseluntersuchungen inkl. der entsprechenden Randbedingungen zusammenfassend dargestellt. Sie werden im Rahmen der anschließenden Simulationsstudie in Kapitel 7 weitergehend betrachtet und bewertet.

Messung	Außenlufttemperatur [°C]	Raumlufttemperatur [°C]	Windgeschwindigkeit [m/s]	Windrichtung [-]	Luftwechsel [1/h]
Winter	-3	13	1,5	W/NW	9 bis 11
Übergangszeit	20	21	2 bis 3	S/SO	6,6
Sommer	24 bis 25	26 bis 28	2 bis 3	O (S)	3,3 bis 3,4

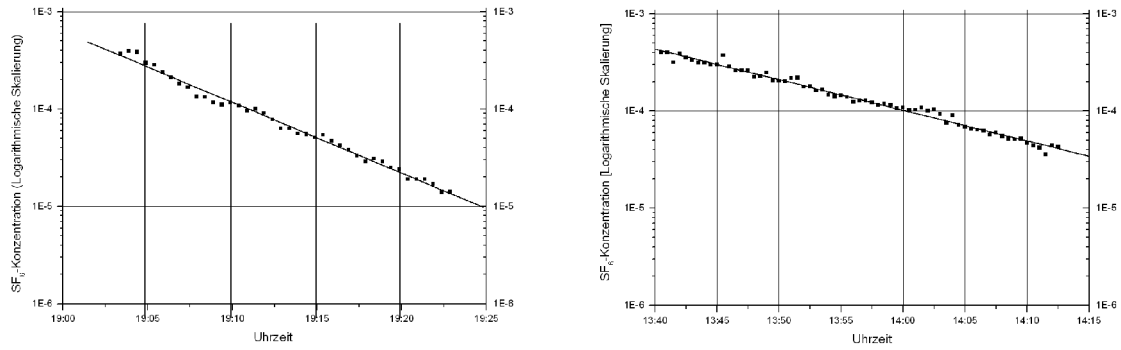
Tabelle 5.7: Randbedingungen und Ergebnisse der Luftwechseluntersuchungen

### 5.4 Unsicherheit der Messergebnisse

Prinzipiell ist jeder Messwert einer physikalischen Messgröße mit einem Fehler behaftet, welcher sich aus der Unvollkommenheit des Messverfahrens selbst bzw. der eingesetzten Messgeräte, sowie aus diversen Umwelteinflüssen zusammensetzt.

Mit der eingesetzten Tracergastechnik kann der gesuchte Volumenstrom nicht direkt ermittelt werden. Er wird aus unmittelbar gemessenen Einzelgrößen berechnet. Der zeitliche Verlauf der Tracergaskonzentration ist neben möglichen Messfehlern abhängig von den tatsächlichen Luftwechseländerungen im Raum, aber auch von Abweichungen, die durch schlechte Durchmischung von Raumluft und Tracergas entstehen. Die Unsicherheit, die bei der Bestimmung des Volumenstroms mit der Konzentrationsabfall-Methode entsteht, setzt sich aus den Ungenauigkeiten der Bestimmung der Raum- und Umgebungslufttemperatur, der Versuchsdauer und der Bestimmung der Anfangs- und Endkonzentration des Tracergases zusammen.

Um die Qualität der Abklingkurven zu bewerten, werden diese im nachfolgenden Diagramm mit einer logarithmischen Skalierung dargestellt (Messung in der Übergangszeit und im Sommer), so dass sich bei der exponentiell abfallenden Kurve ein linearer Verlauf ergeben sollte. Die Korrelationskoeffizienten liegen in beiden Fällen bei  $r = 1 \pm 0,5 - 0,7 \%$ , d.h. die Messpunkte liegen nahezu auf einer Geraden (siehe Bild 5.25).



**Bild 5.25: links: Abklingkurve Messung in der Übergangszeit:  $r = -0,99497$ ; rechts: Abklingkurve Messung im Sommer:  $r = -0,99298$**

Der Korrelationskoeffizient  $r$  wird aus Gleichung 5.1 bestimmt.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sqrt{\left( \sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2 \right) \left( \sum_{i=1}^n y_i^2 - n \bar{y}^2 \right)}} \quad -1 \leq r \leq 1 \quad (5.1)$$

mit:

$\bar{x}, \bar{y}$  [-] Mittelwerte der x- bzw. y-Koordinaten der  $n$  Messpunkte  
 $n$  [-] Anzahl der Messpunkte

Vernachlässigt man den Fehlereinfluss der Temperaturmessung und ist  $T_{Zu} / T_i \approx 1$  lässt sich die Luftwechselzahl aus Gleichung 5.2 bestimmen [Heidt]:

$$n_m = \frac{1}{\Delta t} \left( \ln \frac{C(t)}{C(t + \Delta t)} \right) \quad \text{bzw.} \quad n_m = \frac{1}{t} \left( \ln \frac{C_0}{C(t)} \right) \quad (5.2)$$

Die Genauigkeit der Bestimmung der Luftwechselzahl hängt - wenn man die Zeit  $t$  als exakt messbar betrachtet - von den Messunsicherheiten der Parameter

$$x_1 = C(t), x_2 = C_0 = C(t = 0) \text{ und } x_3 = C_\infty \text{ ab.} \quad (5.3)$$

Bei der Konzentrationsabfallmethode setzt man  $x_3 = \delta x_3 = 0$ . Aus dem Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetz ergibt sich dann als Schätzwert der mittleren quadratischen Abweichung der Luftwechselzahl  $n$ :

$$(\delta n)^2 = \sum_{i=1}^3 \left| \frac{\partial n}{\partial x_i} \cdot \delta x_i \right|^2 \quad (5.4)$$

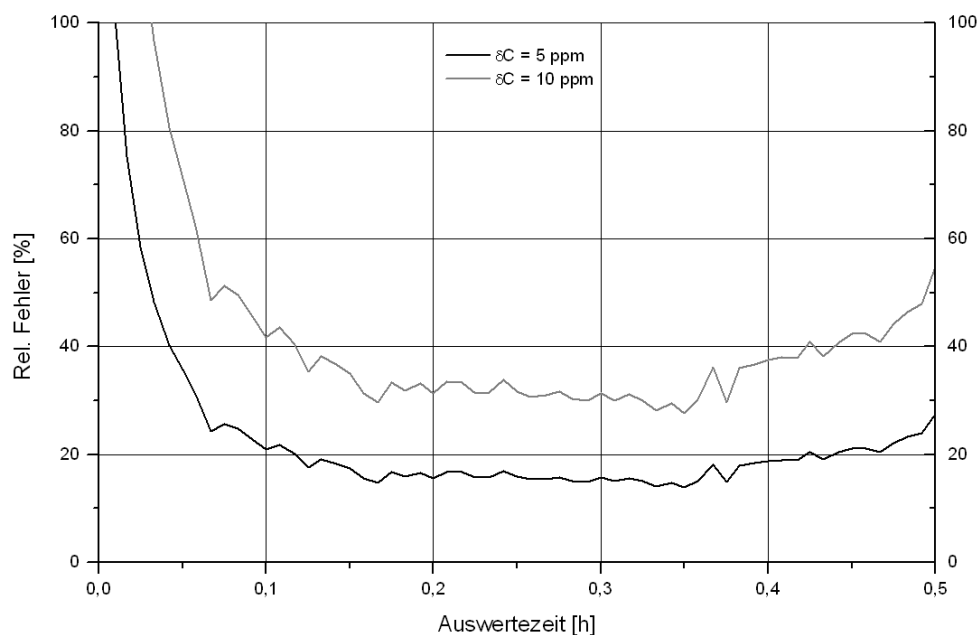
$\delta$  bezeichnet die Abweichung einer Variablen von ihrem Mittelwert. Durch Differentiation von Gleichung 5.2 und Einsetzen in Gleichung 5.4 erhält man:

$$(\delta n)^2 = \frac{1}{t^2} \left[ \left( \frac{\delta C}{C} \right)^2 + \left( \frac{\delta C_0}{C_0} \right)^2 \right] \quad (5.5)$$

Werden  $\delta C_0$ ,  $C_0$  und  $\delta C$  als konstante Werte angesehen, fällt der Fehler  $\delta n$  schnell mit wachsender Zeit ab, bis die Konzentration  $C(t)$  ihrerseits klein wird und damit  $\delta n$  wieder vergrößert. Für die Auswertung liegen optimale Messzeiten ungefähr bei  $t = 1/n$ .

Am Beispiel der Messung im Sommer wird der Verlauf des nach Gleichung 5.5 bestimmten relativen Fehlers in Bild 5.26 über dem Auswertezeitraum dargestellt. Die Berechnungen wurden für den Messpunkt am Magazindach bei einer Ausgangskonzentration von 400 ppm und einem Konzentrationsmessfehler von 5 bzw. 10 ppm durchgeführt.

Der kleinste Fehler resultiert, wenn die Ausgangskonzentration auf ca. 30 % abgesunken ist (vgl. [Maas]; [Roulet]). Die optimale Messzeit beträgt 0,33 bis 0,35 h  $\approx 1/n = 1/3,3 \text{ h}^{-1} = 0,3 \text{ h}$ .



**Bild 5.26: Sommermessung: Rel. Fehler in Abhängigkeit des Auswertezeitraums**

## 6 Simulationsstudie

### 6.1 Beschreibung des Simulationsprogramms

In dieser Arbeit wird das Programm FLUENT 6.0 zur Berechnung verwendet. FLUENT ist ein Strömungssimulationsprogramm der Klasse der sogenannten CFD-Programme (CFD = **C**omputational **F**luid **D**ynamics).

Die Berechnung beruht auf dem numerischen Grundprinzip der Finiten-Volumen-Methode. Die in gängigen Strömungssimulationsprogrammen eingesetzte Methode Computational Fluid Dynamics beruht auf der räumlichen und ggf. zeitlichen Diskretisierung der Navier-Stokes-Gleichungen, wodurch die Differentialgleichungen in einen Satz algebraischer Gleichungen überführt werden, die dann mit numerischen Methoden gelöst werden können. Weiterhin beruht die Berechnung auf teils empirischer, teils numerischer Behandlung von Gegebenheiten, die aus unterschiedlichen Gründen durch die numerische Lösung des vorgenannten Gleichungssystems nicht hinreichend erfasst werden. Die zur Schließung der Gleichungen erforderlichen Randbedingungen können sein:

- Drücke,
- Geschwindigkeiten bzw. Massenflüsse,
- Symmetrieebenen,
- Wandrandbedingungen, z.B. Temperaturen.

Sie müssen das zu simulierende Strömungsgebiet allseitig begrenzen, damit eine numerische Berechnung möglich ist.

Das Programm ist erweiterbar durch programmierte benutzerdefinierte Funktionen. Diese werden im folgenden als UDF's bezeichnet (UDF = **U**ser **D**efined **F**unction). UDF's werden in der Programmiersprache C geschrieben.

### 6.2 Validation

Zur Validation des Simulationswerkzeuges FLUENT 6.0 wird eine bekannte Strömungssituation gewählt. Es handelt sich um die Untersuchung der Druckbeiwertverteilung an einem würfelförmigen Gebäude. Die Ergebnisse von Messungen an würfelförmigen Gebäuden sind in der Literatur am häufigsten zu finden. Der direkte Vergleich mit Ergebnissen anderer Studien konzentriert sich daher auf diesen Gebäudetyp.

Weiterhin werden die Ergebnisse der Windkanaluntersuchung zur Validation der äußeren Randbedingungen herangezogen (→ siehe auch Kapitel 4.4).

### 6.2.1 Druckbeiwertverteilung an würfelförmigen Gebäuden

Die Druckbelastung an einzeln stehenden Baukörpern war bisher Thema vieler Forschungsarbeiten und Veröffentlichungen (z.B. [Kiefer]; [Pernpeintner]; [Stathopoulos]; [Wacker]; [Castro] etc.). Ein detaillierter Vergleich der verschiedenen Studien wurde von [Kiefer] vorgenommen. Seine Ergebnisse sind in Tabelle 6.1 und Bild 6.1 zusammenfassend dargestellt.

Die Außendrucke an Gebäuden in einer Grenzschichtströmung sind im wesentlichen abhängig von der Gebäudegeometrie, der Anströmrichtung, dem Profil der mittleren Geschwindigkeit und der Turbulenz in der Anströmung. In Tab. 6.1 sind die entsprechenden Studien und deren Randbedingungen zusammengestellt. Hierunter befindet sich auch eine experimentelle Untersuchung an einem würfelförmigen Gebäude in Natur [Pernpeintner]. Die Anströmcharakteristik wurde anhand der Angaben entsprechend den Geländekategorien des Eurocode [ENV 1991-2-4] eingestuft.

	Versuchsart	Profil-exponent/ $\alpha$	Jensen-Zahl $H/z_0$	Grenzschichthöhe $\delta H$	Turbulenzintensität $I_u(H)$	Gebäudehöhe $H$ in Natur	Geländetyp nach EC (Tab. 2.2)
<b>Vorliegende Studie</b> <b>Bezogen auf Modell K1</b>	Windkanal	0.27	80	8.75	0.27	16 m	III
<b>PERNPEINTNER</b> <b>(1989)</b>	Natur	0.12 - 0.2	5000 - 167	-	-	10 m	I, II
<b>CASTRO U. ROBINS</b> <b>(1977)</b>	Windkanal	0.25	50	10	0.27		III
<b>WACKER (1991)</b> <b>Grenzschicht Y</b>	Windkanal	0.25	167	6	0.13	25 m	II, III
<b>WACKER (1991)</b> <b>Grenzschicht Z</b>	Windkanal	0.33	17.5	6	0.22	25 m	IV
<b>STATHOPOULOS (1981)</b> <b>“Smooth“</b>	Windkanal	0.16	540	3.7	0.12	68 m	II
<b>STATHOPOULOS (1981)</b> <b>“Built-up“</b>	Windkanal	0.37	12	7.4	0.28	68 m	IV

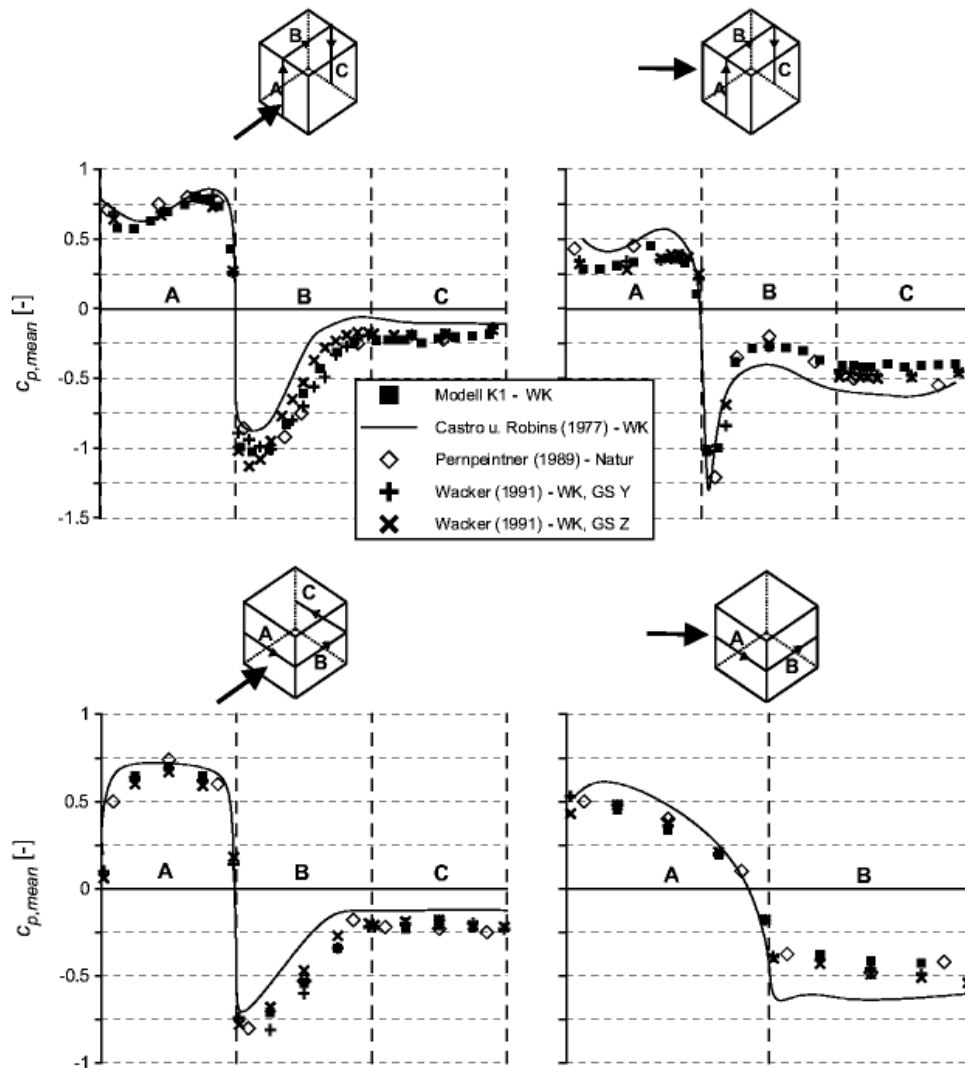
Tabelle 6.1: Grenzschichtparameter der verglichenen Untersuchungen [Kiefer]

Die Ergebnisse dieser Studien wurden in sehr unterschiedlicher Weise dokumentiert und veröffentlicht. Einige enthalten neben den mittleren  $c_p$ -Werten auch Angaben über die Druckfluktuationen oder sogar Spitzenwerte, manche enthalten detaillierte räumliche Verteilungen in Form von Isolinenplots. [Stathopoulos] untersuchte ausschließlich die Druckverhältnisse an Dachflächen.

Da einerseits die untersuchten Gebäude im Naturmaßstab verschiedene Abmessungen aufweisen, und andererseits unterschiedliche Standorte simuliert bzw. untersucht wurden, ist mit Unterschieden hinsichtlich der Ergebnisse zu rechnen.

In Bild 6.1 sind die  $c_{p,mean}$ -Werte entlang charakteristischer vertikaler und horizontaler Schnitte entlang des Gebäudeumfangs für senkrechte und schräge Anströmrichtung enthalten. Insgesamt betrachtet ergibt sich zwischen den Naturmessungen von [Pernpeintner], den Daten

von [Wacker] und den Ergebnissen der vorliegenden Studie von [Kiefer] eine gute Übereinstimmung. Etwas geringere Sogwerte wurden von [Castro] am Dach und der parallelen Seitenwand bei senkrechter Anströmung ermittelt.



**Bild 6.1:** Vergleich der  $c_{p,mean}$ -Werte entlang charakteristischer Horizontal- und Vertikalschnitte mit Daten aus der Literatur [Kiefer]

Die im Rahmen der Arbeit von [Kiefer] erzielten Ergebnisse bilden die Grundlage, die nachfolgend durchgeführten Simulationen zu bewerten.

Hierzu werden die Windkanal-Messergebnisse von Wand- und Dachflächen eines weiteren Testgebäudes von [Kiefer] dargestellt und vergleichend mittels Simulation berechnet. Untersucht wurde ein quaderförmiger Baukörper mit den Abmessungen:

Länge = 64 m, Breite = Höhe = 16 m.

Gemäß Tabelle 6.1 (Modell K1) wird ein Profilexponent von 0,27 mit einer Turbulenzintensität von ebenfalls 0,27 eingestellt. Die räumliche Verteilung der Druckbeiwerte wird in Form von Isolinenplots dargestellt. Die Definition der Anströmrichtungen für die Isolinenplots ist in Bild 6.2 gegeben.

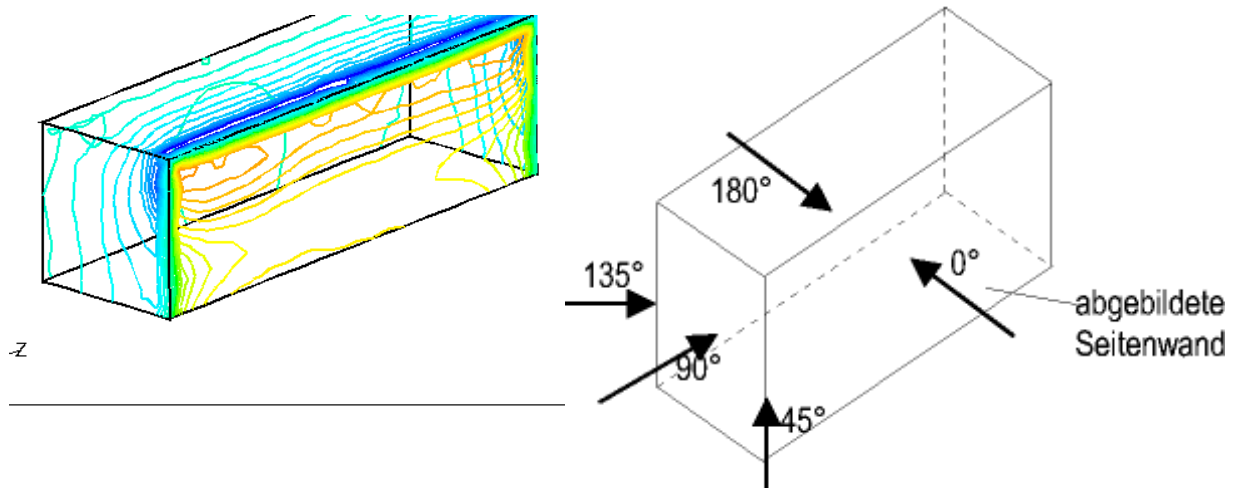


Bild 6.2: Definition der Anströmrichtungen für die Isoliniendarstellung

Die Bilder 6.3 bis 6.7 zeigen jeweils die Ergebnisse von [Kiefer] und das entsprechende Simulationsergebnis. Bei unmittelbar durch Wind beanspruchten Einzelbauteilen treten an den Eck- und Randbereichen von Wand- und Dachflächen Sog- oder Druckspitzen auf, die durch erhöhte Beiwerte hervortreten. Bei positiven Druckbeiwerten liegt ein Überdruck auf der Fassade vor, bei negativen Werten ein Unterdruck.

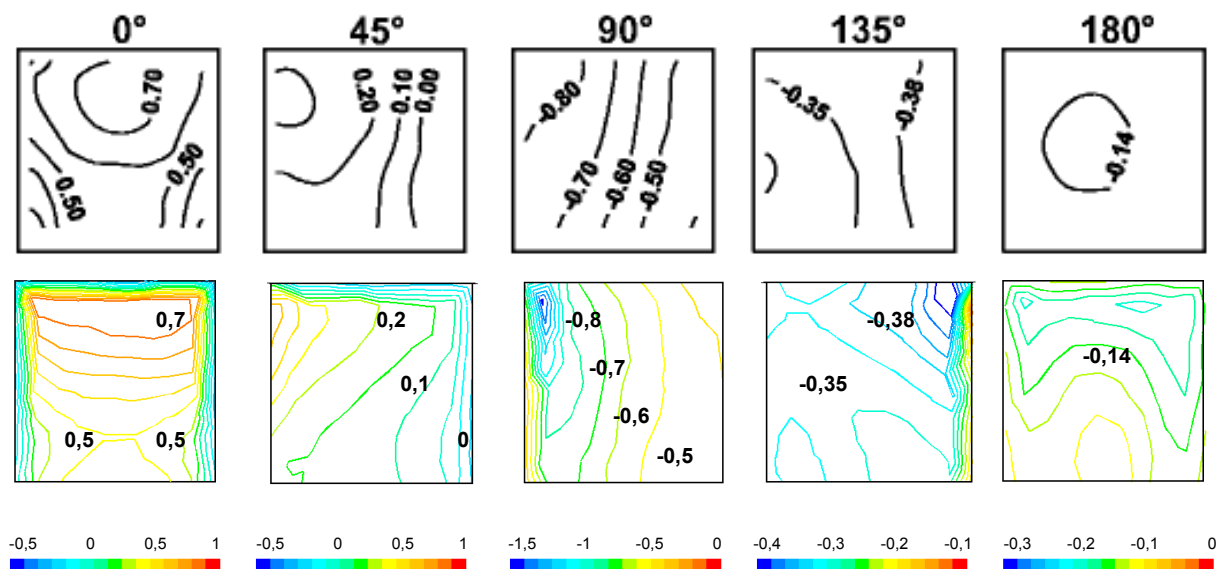


Bild 6.3:  $c_p$ -Werte kurze Seitenwände; oben: Ergebnisse von [Kiefer]; unten: Ergebnisse Simulation

Bei frontaler Anströmung der Wandflächen bildet sich der höchste Druck im Staupunktbereich in einer Höhe von 0,7 bis 0,8 H (= Gebäudehöhe [m]) aus. Bei Schräganströmung wandert dieser Bereich zur angeströmten Gebäudekante und der Druck nimmt entlang der Wandfläche kontinuierlich ab.



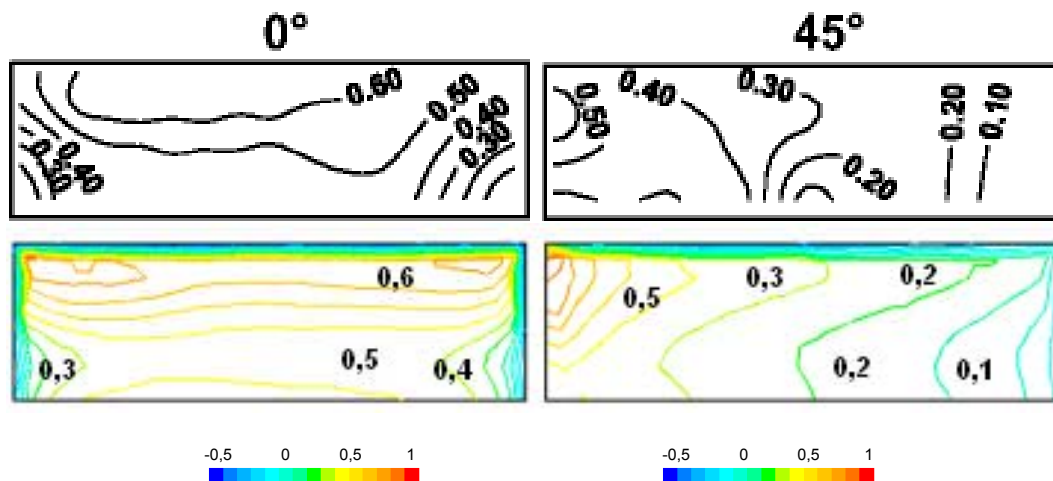


Bild 6.4:  $c_p$ -Werte lange Seitenwände I; oben: Ergebnisse von [Kiefer]; unten: Ergebnisse Simulation

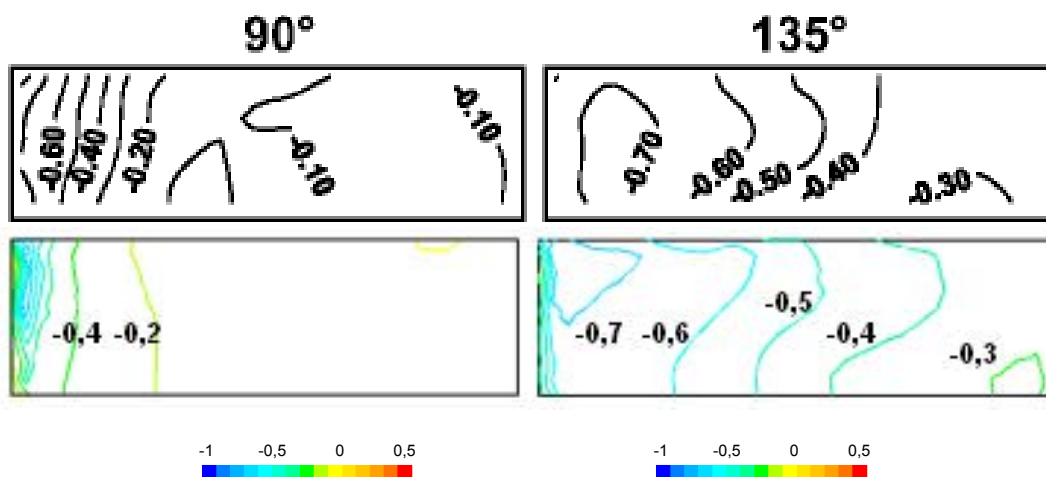


Bild 6.5:  $c_p$ -Werte lange Seitenwände II; oben: Ergebnisse von [Kiefer]; unten: Ergebnisse Simulation

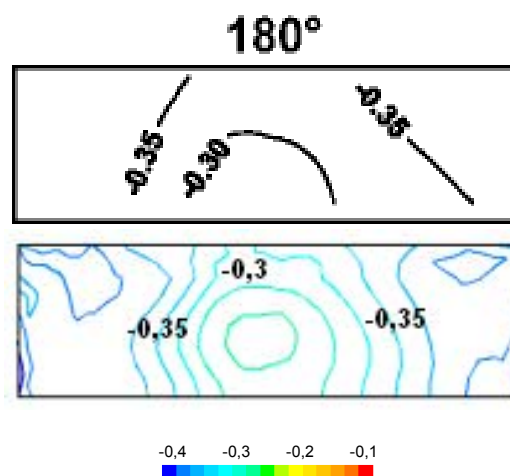


Bild 6.6:  $c_p$ -Werte lange Seitenwände III; oben: Ergebnisse von [Kiefer]; unten: Ergebnisse Simulation

An der Dachfläche (Flachdach, Bild 6.7) entsteht in der turbulenten Grenzschichtströmung aufgrund der Ablösung der Strömung an der Vorderkante und der Wiedieranlegung ein starkes Druckgefälle in Strömungsrichtung.

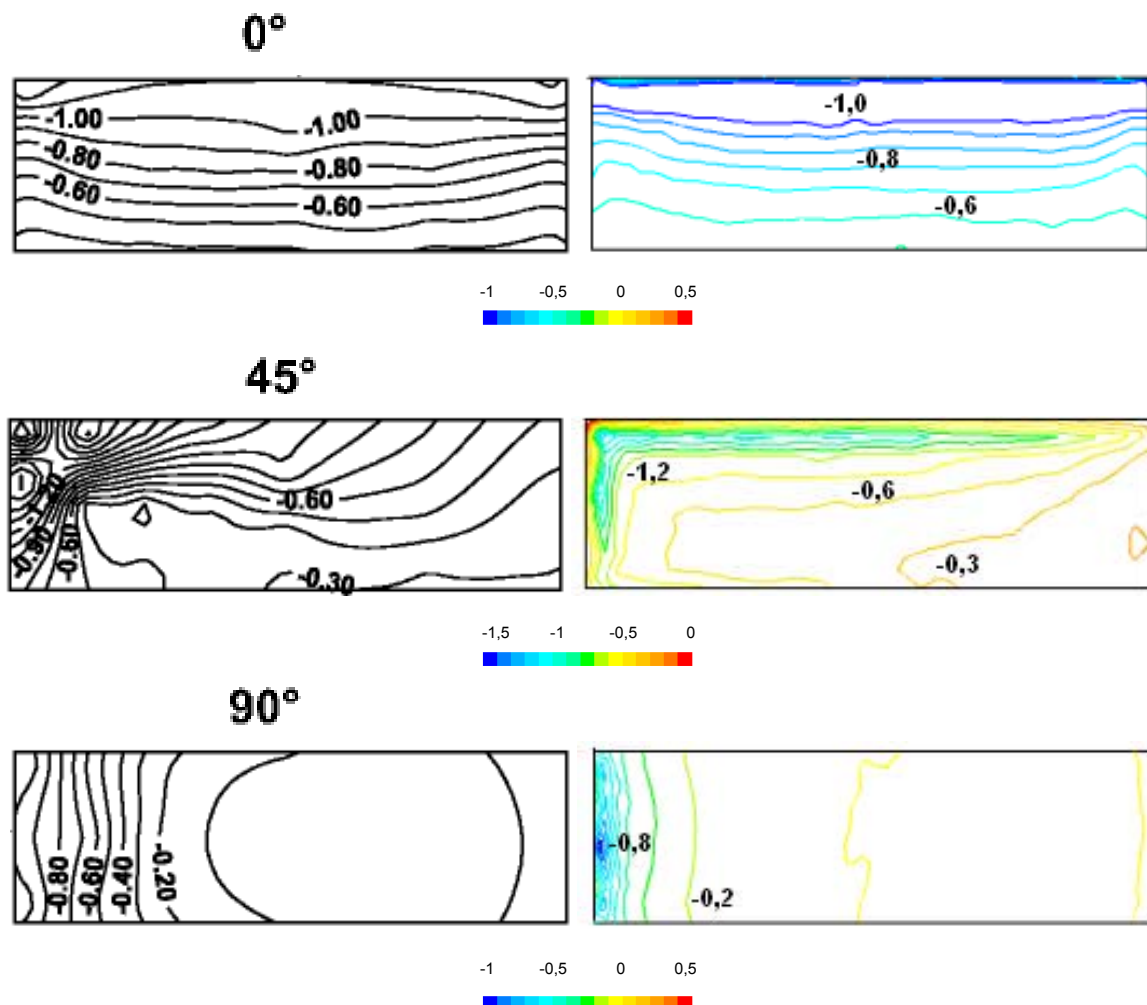


Bild 6.7:  $c_p$ -Werte Dachfläche; links: Ergebnisse von [Kiefer]; rechts: Ergebnisse Simulation

### Ergebnis:

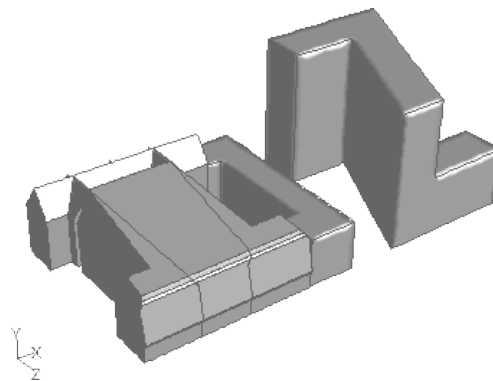
Die Simulation der Druckverteilung an einem quaderförmigen Gebäude stimmt bei Verwendung des korrekten Profilexponenten sehr gut mit den Messergebnissen von [Kiefer] überein.

Fluent stellt verschiedene Verfahren zur Turbulenzmodellierung zur Verfügung. Die besten Ergebnisse lieferte das Realizable-k- $\epsilon$ -Modells, das für alle weiteren Berechnungen verwendet wird.

### 6.2.2 Kalibrierung des Simulationsmodells auf Basis der Windkanalstudie

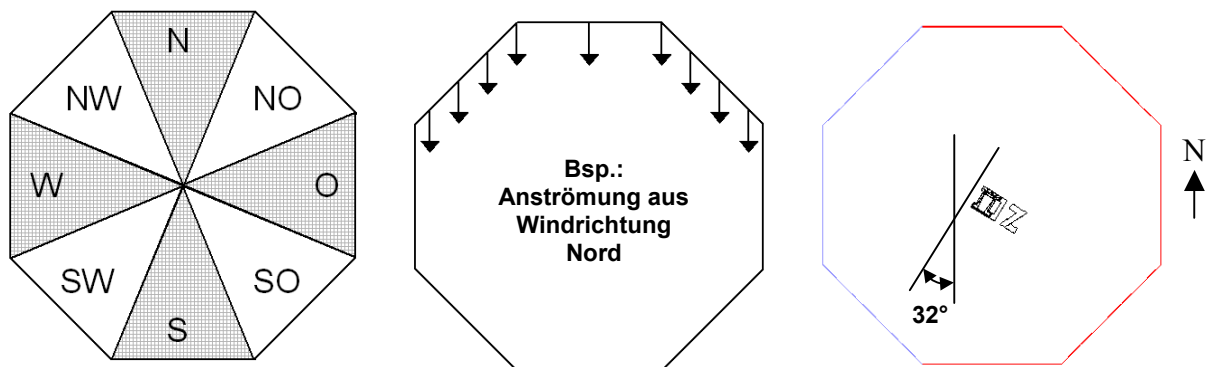
Das Energieforum Berlin wird mit dem Preprozessor Gambit 2.0 als Modell abgebildet, das Rechengitter und die Randbedingungen werden in das Simulationsprogramm FLUENT 6.0 exportiert. Es wird die Druckverteilung am Gebäude simuliert.

Zunächst wird das Geschwindigkeitsprofil des Windkanals als Randbedingung programmiert. Um die tatsächlichen Verhältnisse der Druckverteilung am Gebäude abzubilden, werden geeignete Randbedingungen in Fluent spezifiziert und die simulierte Druckverteilung wird mit Messwerten aus der vorhandenen Windkanalstudie verglichen. Die entsprechenden Modelle werden so lange variiert, bis die Abweichung zwischen berechneten und gemessenen Ausgabewerten den Anforderungen entsprechend klein genug geworden ist. Das Gebäudemodell für die Strömungssimulation ist in Bild 6.8 dargestellt. Es entspricht in seinen Abmessungen dem im Windkanal untersuchten Modell.



**Bild 6.8:** Simulationsmodell analog zum Windkanalmodell zur Kalibrierung durch vorhandene Messwerte (nur Außenfläche des Gebäudes)

Für die Simulation des Windkanalversuches wird ein Oktaeder um das Außenmodell des Energieforums angeordnet, um die acht Hauptwindrichtungen abzubilden. Die Anströmung aus jeder Windrichtung erfolgt über drei nebeneinander liegende Seiten, so dass das Gebäude gleichmäßig umströmt wird. Die Anordnung der Windsektoren zeigt Bild 6.9. Das Gebäudemodell wird entsprechend zum Windkanalmodell um  $32^\circ$  gedreht.



**Bild 6.9:** links: Anordnung der Windsektoren in der Simulation und rechts: Lage des Gebäudemodells

Das Windprofil mit einem Profilexponenten von  $\alpha = 0,31$  wird über eine UDF in das Programm eingebunden. Eine Nullpunktverschiebung wurde bei der Versuchsdurchführung im Windkanal nicht berücksichtigt. Bild 6.10 zeigt das Anströmprofil im Simulationsmodell.

**!! Wichtiger Hinweis:** Bei *allen* nachfolgend genannten Windgeschwindigkeiten handelt es sich um die Windgeschwindigkeit in einer Referenzhöhe von 10 m, die nach oben bzw. unten entsprechend des in Bild 6.10 dargestellten Anströmprofils zu- oder abnimmt.

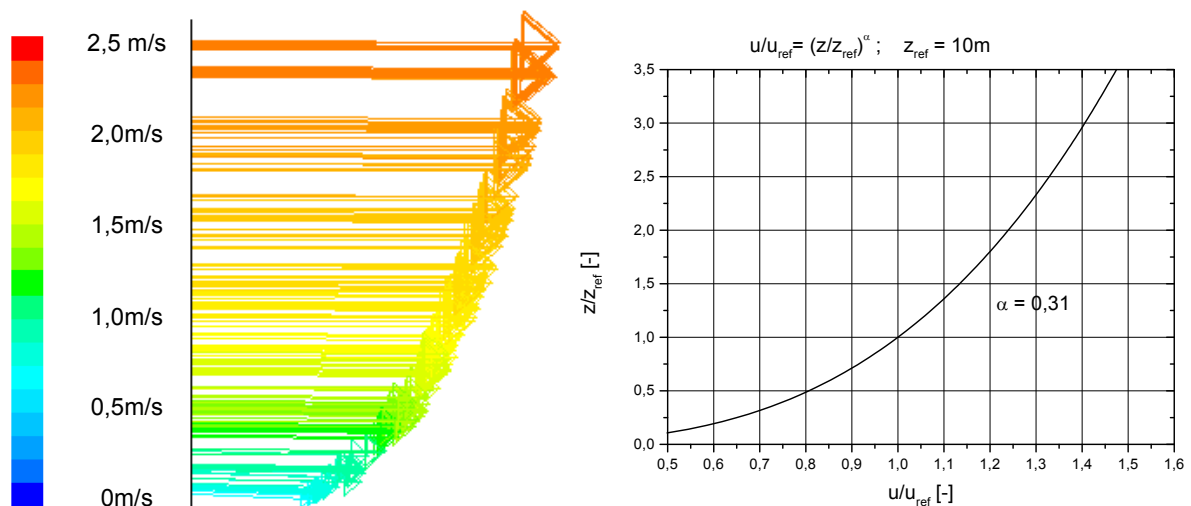


Bild 6.10: Anströmprofil im Simulationsmodell mit einem Profilexponenten von  $\alpha = 0,31$  und einer Referenzgeschwindigkeit von 1 m/s in 10 m Höhe

### 6.2.3 Vergleich der Druckbeiwerte Windkanalmessung - Simulation

Tabelle 6.2 zeigt auszugsweise die Ergebnisse der Windkanaluntersuchung für die Messpunkte an der West- und Südfassade bei Wind aus Westen. In Bild 6.12 ist beispielhaft die gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation für die West- und Südfassade sowie das Dach des Gebäudes bei Wind aus Westen dargestellt (Hauptwindrichtung; Werte siehe Anhang). Es zeigt die grafische Darstellung der Druckbeiwerte aus der Windkanaluntersuchung (Oberflächendiagramm rechts) sowie die entsprechenden Ergebnisse der Simulation als Farbplot (Zahlenwerte = Windkanalergebnisse).

Messpunkte	$c_p$ -Werte	Messpunkte	$c_p$ -Werte	Messpunkte	$c_p$ -Werte
FW 1-1	0,95	FS 1-1	-0,19	FS 3-4	0,25
FW 2-1	0,63	FS 1-2	-0,25	FS 4-1	0,28
FW 2-2	0,88	FS 2-1	0,28	FS 4-2	0,32
FW 3-1	0,82	FS 2-2	0,25	FS 4-3	0,28
FW 4-1	0,88	FS 2-3	0,19	FS 4-4	0,28
FW 4-2	0,88	FS 2-4	0,25	FS 5-1	0,32
FW 5-1	0,35	FS 3-1	0,28	FS 5-2	0,32
		FS 3-2	0,25	FS 5-3	0,25
		FS 3-3	0,32	FS 5-4	0,25

Tabelle 6.2: Druckbeiwerte an den Messpunkten West- und Südfassade, Windrichtung West [K+L]

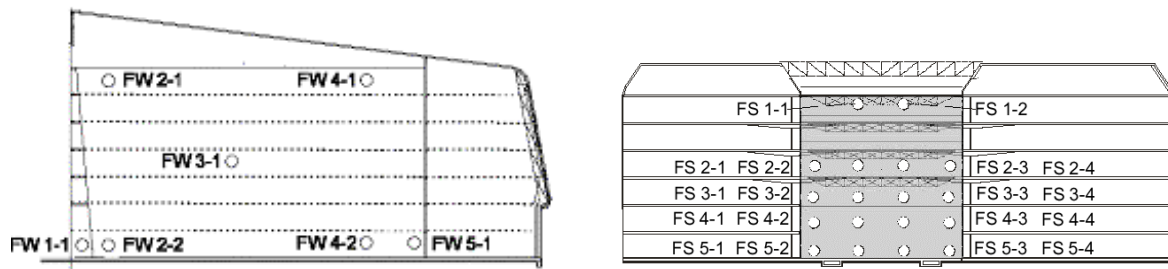
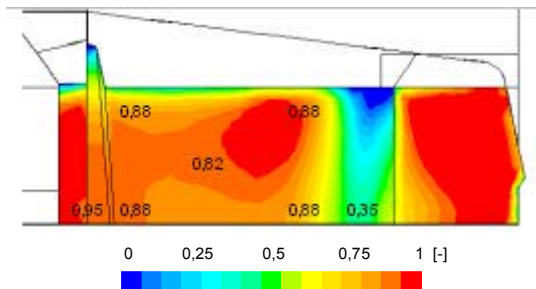
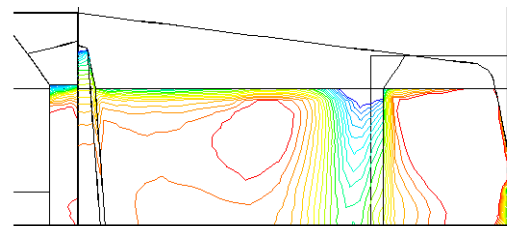


Bild 6.11: Lage der Messpunkte links: West- und rechts: Südfassade [K+L]

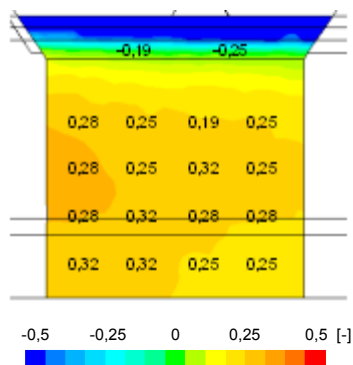
Die Simulation der Druckverteilung stimmt sehr gut mit den Messergebnissen überein.



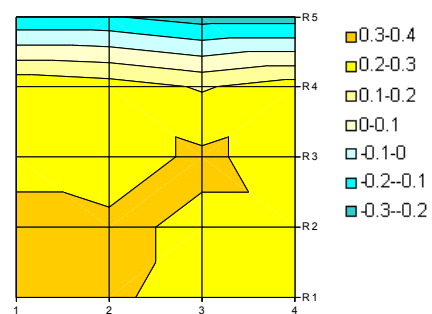
Simulation (Zahlenwerte = Windkanalergebnis)



Windkanal: Messwerte als Oberflächendiagramm



Simulation (Zahlenwerte = Windkanalergebnis)



Windkanal: Messwerte als Oberflächendiagramm

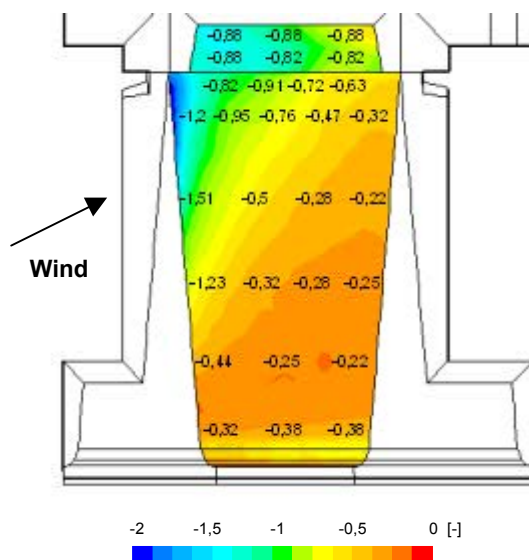
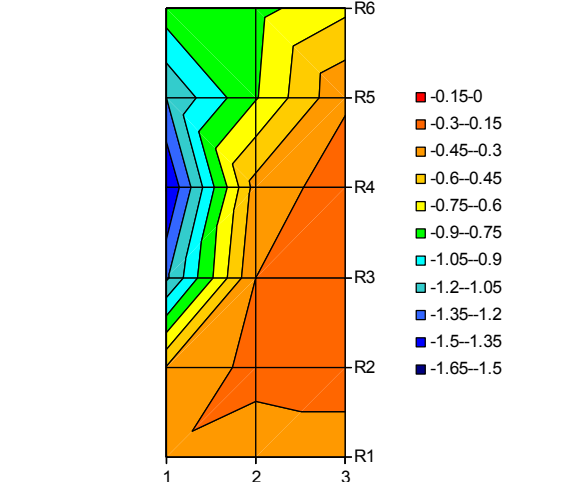


Bild 6.12: Druckbeiwerte an den Messpunkten West- und Südfassade und auf dem Dach, Windrichtung West [K+L]; links: Simulation, rechts: Messwerte als Oberflächendiagramm (außer Westwand)



### 6.2.4 Einfluss des Turbulenzgrades in der Anströmung

In der Dokumentation der Windkanaluntersuchung sind keine Angaben zum Turbulenzgrad in der Anströmung enthalten. Der statische Druck am Gebäude, der zur Bestimmung der  $c_p$ -Werte benötigt wird, wird bei gleicher Anströmungsgeschwindigkeit quantitativ vom Turbulenzgrad beeinflusst. Die hieraus resultierende Abweichung kann erheblich werden. Bild 6.13 zeigt beispielhaft die Verteilung des statischen Druckes an der Westfassade bei unterschiedlichen Turbulenzgraden, Bild 6.14 die Druckwerte entlang einer vertikalen Achse am Gebäude.

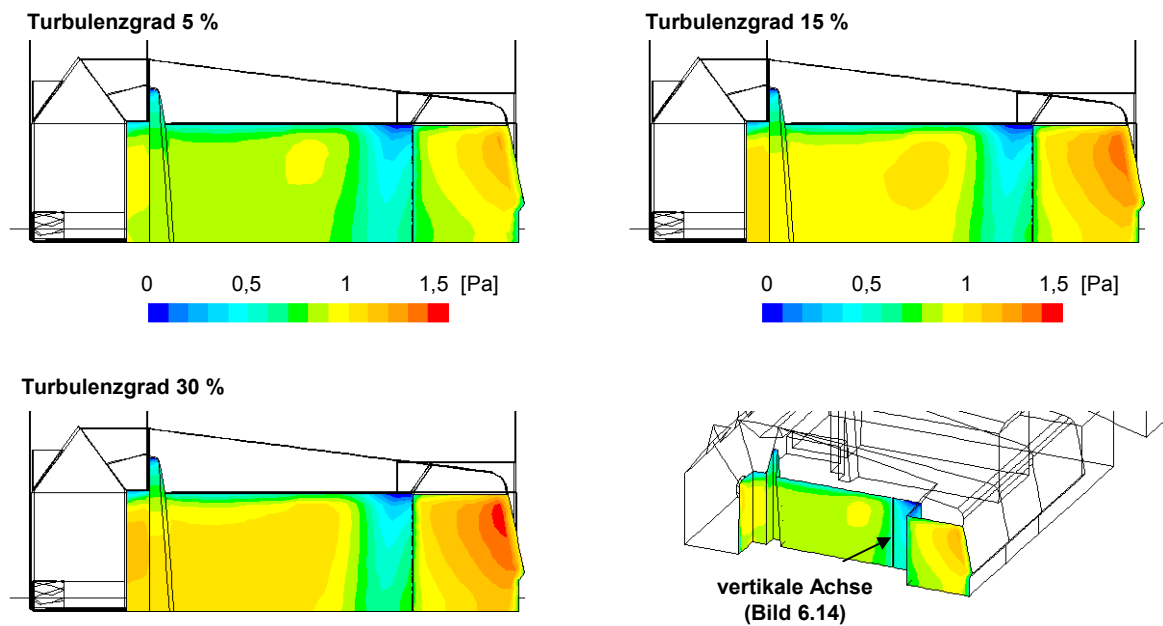


Bild 6.13: Statischer Druckverlauf bei unterschiedlichen Turbulenzgraden in der Anströmung

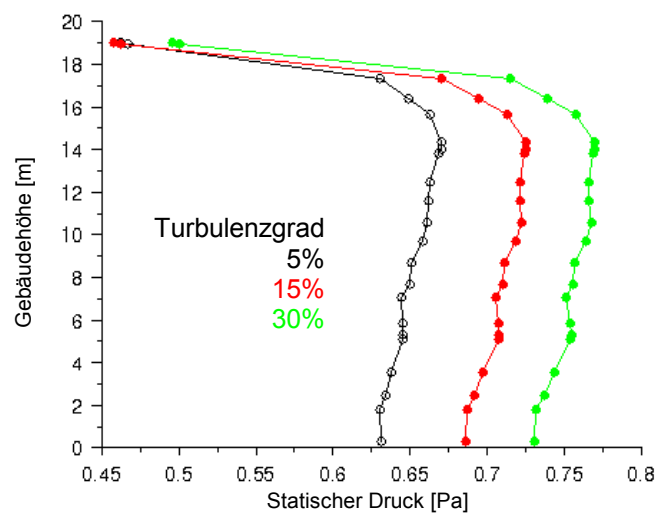


Bild 6.14: Statischer Druckverlauf entlang einer vertikalen Achse an der Westfassade bei unterschiedlichen Turbulenzgraden in der Anströmung

### Ergebnis:

Die beste Übereinstimmung zwischen Windkanalergebnis und Simulation wurde bei einem **Turbulenzgrad von 30 %** erzielt. Dieser Wert wird für alle weiterführenden Berechnungen verwendet. Auf Basis der in Kapitel 6.2.2 bis 6.2.4 erzielten Ergebnisse wird in der anschließenden Parameterstudie der resultierende Luftwechsel bei Durchströmung des Atriums für verschiedene Windrichtungen und Windgeschwindigkeiten bestimmt.

### 6.3 Parameterstudie zur windinduzierten Raumluftrömung

Im Rahmen dieser Parameterstudie wird untersucht, welchen Einfluss die Anströmrichtung auf die Höhe des Raumlufwechsels hat, bzw. wie sich der Luftwechsel bei zunehmender Windgeschwindigkeit ändert. In Kapitel 6.3.2 wird die Druckverteilung im Bereich der geschlossenen und geöffneten Zu- und Abluftlamellen gegenübergestellt. Weiterhin wird die Fläche der Zu- und Abluftöffnung von 25 bis 100 % variiert, um den Einfluss des Öffnungsanteils auf die Ausbildung der Raumluftrömung zu untersuchen (→ Kapitel 6.3.3). Die Ergebnisse dieser Parameterstudie werden in Kapitel 7 zur Bewertung der Luftwechseluntersuchungen herangezogen.

Die nachfolgenden Simulationen werden mit einem erweiterten Gebäudemodell durchgeführt. Das neue Simulationsmodell wurde gegenüber dem Windkanalmodell modifiziert, um es dem realen Gebäude anzupassen. Die ursprünglich geplante Umgebungsbebauung aus dem Windkanalmodell (→ Bild 4.15) wird bei den folgenden Berechnungen nicht berücksichtigt, da sie bisher nicht realisiert wurde und die Strömungsverhältnisse am Gebäude verfälschen würde. Die äußeren Randbedingungen entsprechen ansonsten denen der mittels Windkanalstudie kalibrierten Druckverteilung am Gebäude aus Kapitel 6.2.2.

Die Definition der Anströmrichtungen und das Modell für die Simulation zeigt Bild 6.15. Die Anströmrichtung  $0^\circ$  kennzeichnet die senkrechte Anströmung der nach Südwesten orientierten Zuluftöffnung. Entsprechend Bild 6.9 wird ein Oktaeder um das Gebäudemodell des Energieforums angeordnet, um die acht Hauptwindrichtungen abzubilden.

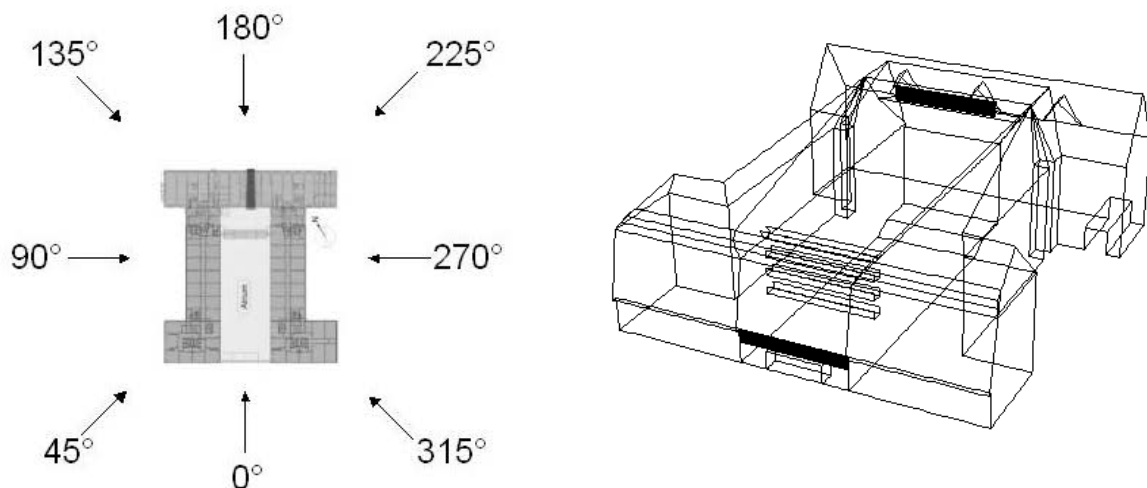


Bild 6.15: links: Definition der Anströmrichtungen; rechts: Gebäudemodell des Energieforums

Das in Bild 6.15 dargestellte Simulationsmodell wird um den Innenraum des Atriums erweitert, so dass die Durchströmung des Atriums bei geöffneten Lamellen direkt berechnet werden kann. Die Lamellen werden im geometrischen Modell abgebildet. Im geöffneten Zustand sind sie um 90° geneigt.

### 6.3.1 Simulationsergebnisse

Insgesamt wurden acht Anströmrichtungen (0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, 315°), fünf Windgeschwindigkeiten (1 m/s, 2 m/s, 3 m/s, 4 m/s, 5 m/s) und vier verschiedene Öffnungsanteile (25 %, 50 %, 75 %, 100 %) untersucht. Bild 6.16 zeigt die Ergebnisse der 160 Varianten und die daraus berechneten Regressionsgraden, Tabelle 6.3 die dazugehörigen Korrelationskoeffizienten und die nach Gleichung 6.1 ermittelte Standardabweichung. Die Standardabweichung  $s$  (mittlerer Fehler der Einzelmessung) ist ein Schätzwert für den Parameter  $\sigma$  (gleichen Namens) der normalverteilten Messgröße.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (6.1)$$

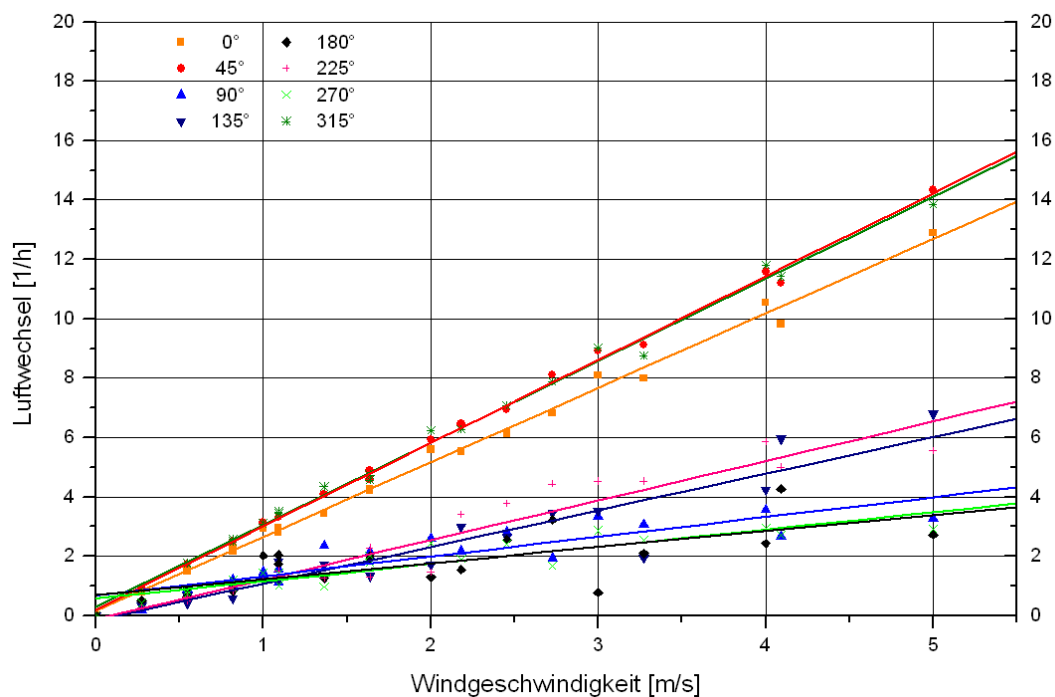


Bild 6.16: Simulationsergebnisse der Luftwechselberechnung und Darstellung der Regressionsgeraden

Anströmrichtung	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
Korrelationskoeffizient	0,9975	0,99889	0,88763	0,94143	0,73509	0,96124	0,90822	0,99767
Standardabweichung	0,25052	0,18654	0,4847	0,62289	0,69958	0,53899	0,37815	0,26657

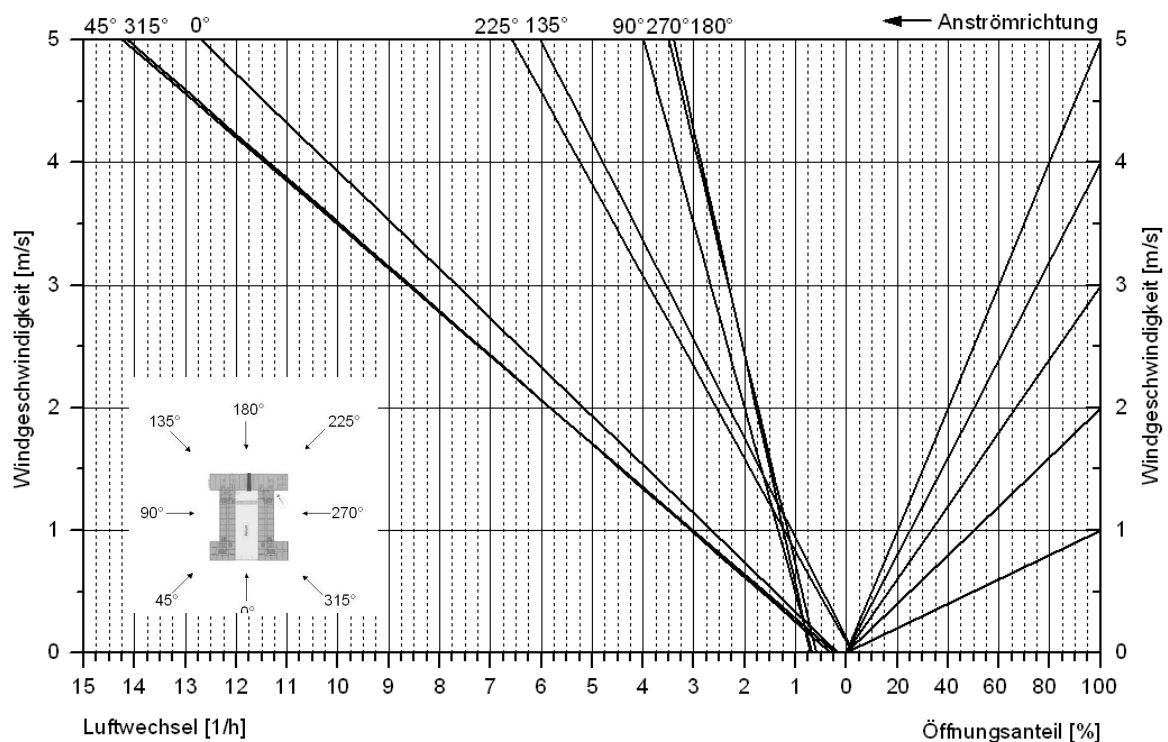
Tabelle 6.3: Korrelationskoeffizienten und Standardabweichung der Ausgleichsgeraden



Bei der Berechnung des Korrelationskoeffizienten  $r$  liegen die  $n$  Messpunkte immer dann nahezu auf einer Geraden, wenn  $r$  sich nur wenig von  $-1$  oder  $+1$  unterscheidet. Dies gilt insbesondere für die Anströmrichtungen  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  und  $315^\circ$ , also für Wind in Richtung der Zuluftöffnung. Der Luftwechsel steigt linear mit zunehmender Windgeschwindigkeit an. Auch zwischen Öffnungsanteil und Luftwechsel besteht ein linearer Zusammenhang.

Bei den anderen Anströmrichtungen nimmt die Abweichung von der Geraden zu. Dies hängt mit der Umkehr der Anströmsituation zusammen. Die größte Abweichung tritt erwartungsgemäß bei der Anströmrichtung  $180^\circ$  auf. Hierbei strömt Luft durch die Zu- und Abluftöffnungen sowohl ins als auch aus dem Atrium. Im Bereich der Öffnungen kommt es zu Kurzschlussströmungen.

Die Ergebnisse aller Berechnungen sind im Anhang A zusammengestellt. Aus den simulierten Luftwechseln wurde das nachfolgende Diagramm generiert, mit dessen Hilfe der windinduzierte Luftwechsel für die acht Hauptwindrichtungen bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten und bei unterschiedlichen Öffnungsanteilen direkt abgelesen werden kann (siehe Bild 6.17).



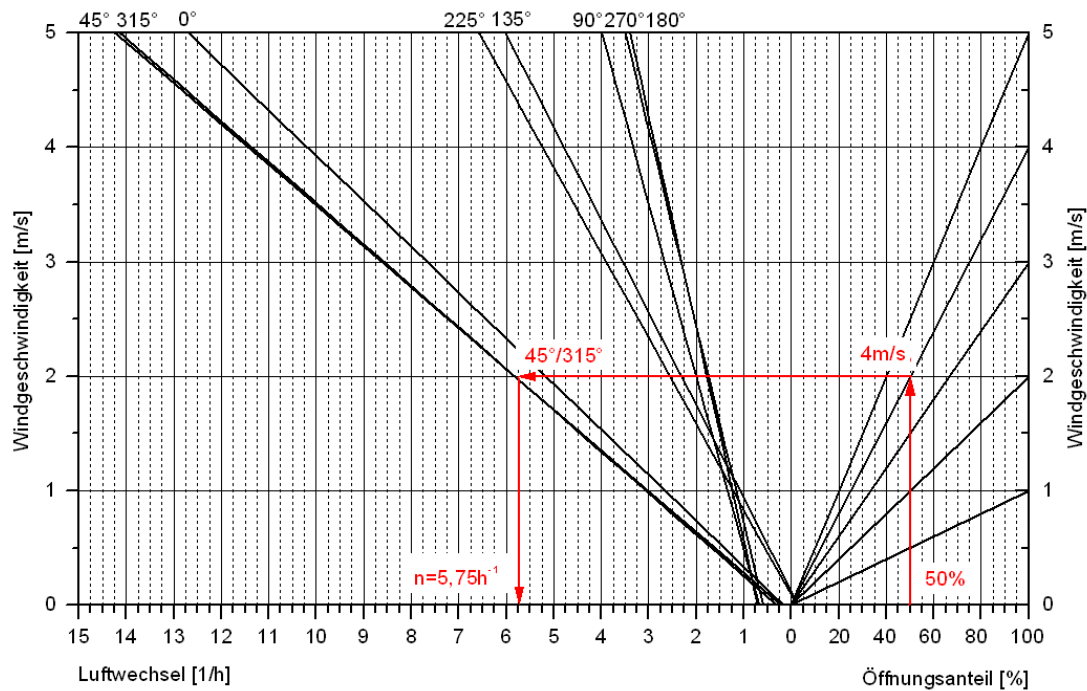
**Bild 6.17:** Diagramm zur Ermittlung des Luftwechsels als Funktion der Windrichtung, der Windgeschwindigkeit und der geöffneten Fensterfläche

Die maximale Bruttoquerschnittsfläche der Zuluftöffnung beträgt  $56,7 \text{ m}^2$ , die der Abluftöffnung  $70,3 \text{ m}^2$ . Diese Werte entsprechen einem Öffnungsanteil von 100 % (inkl. der Lamellen). Bezogen auf die Grundfläche des Atriums entspricht die Bruttoquerschnittsfläche der Zuluftöffnung 4,8 % der Grundfläche, die Fläche der Abluft beträgt 6 %. Bei einem Öffnungsanteil von 50 % sind beide Flächen nur zur Hälfte geöffnet.

### Anwendung des Diagramms:

Bild 6.18 zeigt eine mögliche Anwendungsart des Diagramms. So kann beispielsweise der Luftwechsel bei einem festgelegten Öffnungsanteil für Wind aus einer bestimmten Richtung ermittelt werden.

**Beispiel:** Bei einem Öffnungsanteil von 50 % und einer Windgeschwindigkeit von 4 m/s bei einer Anströmung aus 45° bzw. 315° beträgt der Luftwechsel im Innenraum 5,75 h<sup>-1</sup>.



**Bild 6.18:** Diagramm zur Ermittlung des Luftwechsels als Funktion der Windrichtung, der Windgeschwindigkeit und der geöffneten Fensterfläche → Anwendung

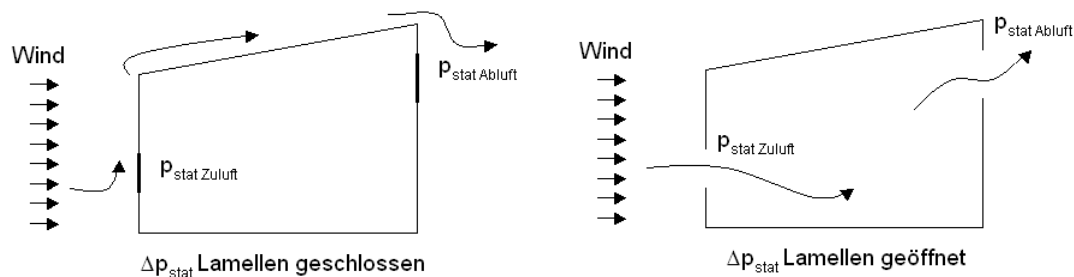
Umgekehrt kann darüber hinaus der für einen bestimmten Luftwechsel erforderliche Öffnungsanteil ermittelt werden (Bild 6.18, umgekehrte Pfeilrichtung).

**Beispiel:** Der Luftwechsel im Innenraum soll 5,75 h<sup>-1</sup> betragen → bei einer Anströmung aus 45° bzw. 315° müssen bei einer Windgeschwindigkeit von 4 m/s 50 % der Zu- und Abluftfläche geöffnet werden.

Mit Hilfe des Diagramms können bei einem flexiblen Öffnungsflächenanteil Regelstrategien für eine natürliche Atriumlüftung in Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit und -richtung entwickelt werden. Die dazu erforderlichen Messgrößen sind über eine Wetterstation am Gebäude verfügbar. Darüber hinaus kann bei Kenntnis der für einen bestimmten Gebäudestandort im Jahresdurchschnitt auftretenden Häufigkeiten von Windrichtung und Windgeschwindigkeit der durchschnittliche windinduzierte natürliche Luftwechsel in einem Atrium bestimmt werden (→ Kapitel 7.4).

### 6.3.2 Wirksame Druckdifferenz

Bereits in Kapitel 4.4 wurde die Frage gestellt, ob Druckbeiwerte von geschlossenen Baukörpern und die daraus resultierenden Staudrücke zur rechnerischen Ermittlung des Innenraumluftwechsels geeignet sind. Um dies zu überprüfen, wurde der Luftwechsel nach Formel 3.7 gem. British Standard Method (BSM) für Windgeschwindigkeiten von 1 bis 5 m/s aus zwei verschiedenen Anströmrichtungen berechnet. Die für die Berechnung erforderliche wirksame Druckdifferenz wurde aus den Ergebnissen der Simulation bestimmt. Sie wurde aus den Flächenmitteln der statischen Druckverteilung von Zu- und Abluftöffnung gebildet (für geöffnete und geschlossene Lamellen → Bild 6.19).



**Bild 6.19:** Ermittlung der wirksamen Druckdifferenz  $\Delta p_{\text{stat}}$  an einem geschlossenen (links) und an einem durchströmten Baukörper (rechts)

Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.4 zusammenfassend dargestellt. Die nach BSM berechneten Luftwechsel werden den Simulationsergebnissen bei 100 % geöffneter Fassade gegenübergestellt.

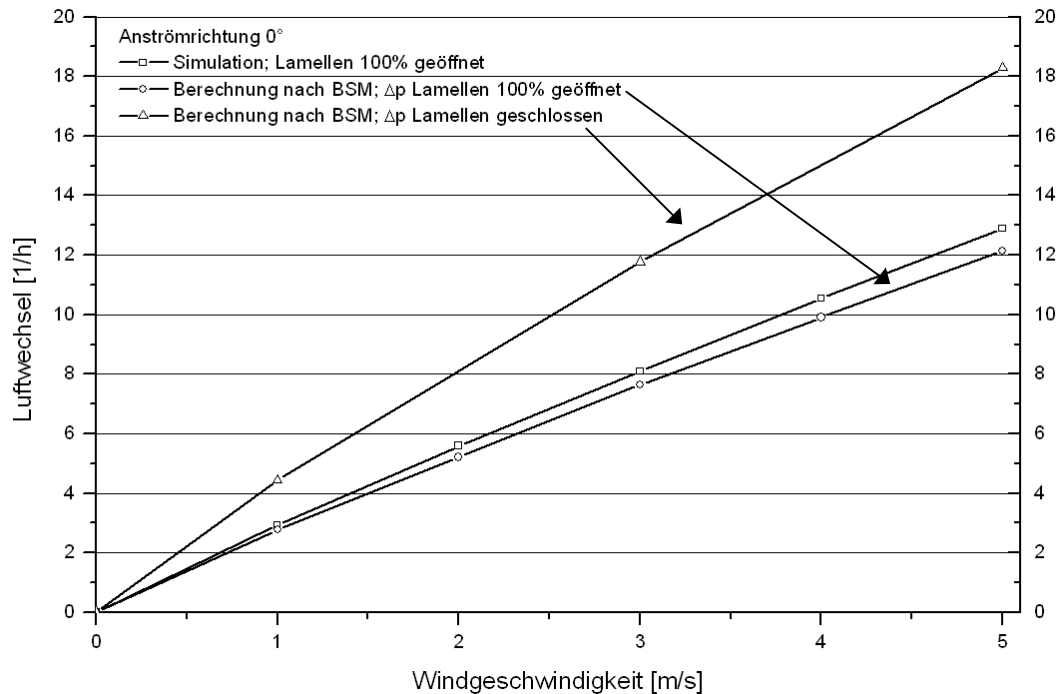
	Anströmrichtung 0°			Anströmrichtung 45°		
	Simulation	BSM	BSM	Simulation	BSM	BSM
Windgeschwindigkeit	[1/h]	$\Delta p$ Zu-/Abluft auf [1/h]	$\Delta p$ Zu-/Abluft zu [1/h]	[1/h]	$\Delta p$ Zu-/Abluft auf [1/h]	$\Delta p$ Zu-/Abluft zu [1/h]
1[m/s]	2,93	2,77	4,43	3,13	3,1	4,62
2[m/s]	5,59	5,21	-	5,94	5,92	-
3[m/s]	8,1	7,65	11,77	8,95	8,8	12,43
4[m/s]	10,54	9,91	-	11,65	11,71	-
5[m/s]	12,89	12,14	18,28	14,38	13,93	20,15

**Tabelle 6.4:** Luftwechsel in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit; Vergleich Ergebnisse Simulation und Berechnungen nach BSM (Druckverteilung geöffnete und geschlossene Fassade)

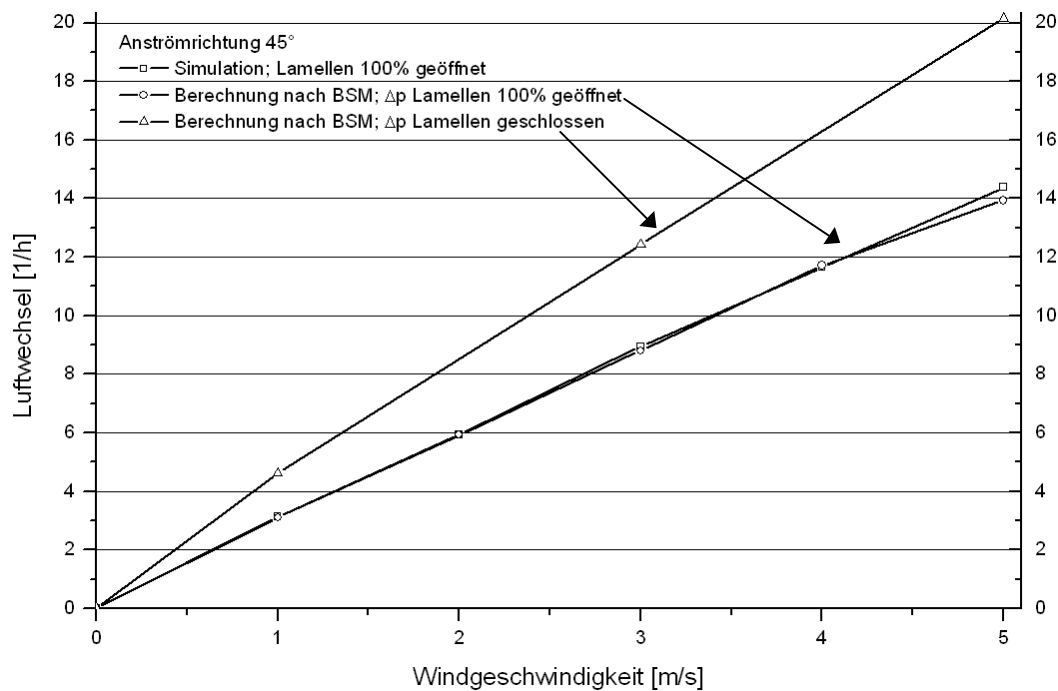
#### Ergebnis:

Das Berechnungsergebnis nach British Standard Method (BSM) stimmt bei Verwendung der Druckdifferenz von geöffneten Lamellen gut mit den Ergebnissen der Simulation überein. Die ermittelte Druckdifferenz bei geschlossenen Lamellen liefert in der Berechnung um 40 bis 50 % höhere Luftwechsel als die Simulation.

Die Bilder 6.20 und 6.21 zeigen den berechneten Luftwechsel in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit bei einer Anströmung aus  $0^\circ$  und aus  $45^\circ$ . Zum Vergleich sind die Ergebnisse aus der Simulation bei 100 % geöffneter Zu- und Abluftfläche dargestellt.



**Bild 6.20: Luftwechsel in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit; Vergleich der Ergebnisse aus Simulation und Berechnungen nach BSM (Druckverteilung geöffnete und geschlossene Fassade), Anströmrichtung  $0^\circ$**



**Bild 6.21: Luftwechsel in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit; Vergleich der Ergebnisse aus Simulation und Berechnungen nach BSM (Druckverteilung geöffnete und geschlossene Fassade), Anströmrichtung  $45^\circ$**

Am Beispiel der Anströmrichtung  $0^\circ$  bei einer Windgeschwindigkeit von 3 m/s werden nachfolgend die Druckverteilungen des statischen Druckes im Bereich der Zu- und Abluftlamellen bei 100 % geöffneter und geschlossener Fassade gegenübergestellt. Diese Druckdifferenz wird zur Berechnung des windinduzierten Innenraumluftwechsels nach Formel 3.7 benötigt.

Die für den Luftwechsel maßgebliche Druckdifferenz zwischen Zu- und Abluftöffnung beträgt bei geöffneten Lamellen 3,65 Pa, bei geschlossenen Lamellen steigt sie auf 8,65 Pa, beträgt also mehr als das Doppelte (siehe Bild 6.22 und 6.23).

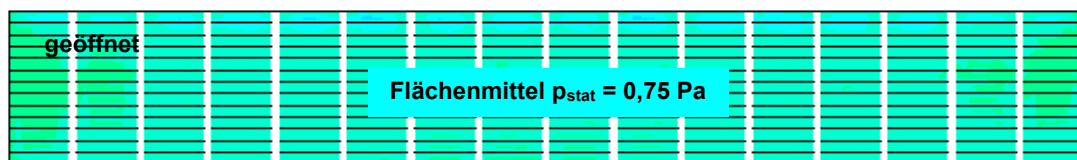
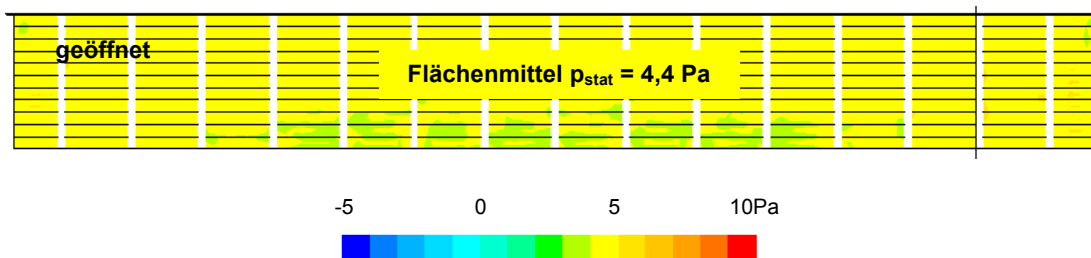


Bild 6.22: Verteilung des statischen Druckes im Bereich der Zu- und Abluftlamellen;  
oben: Zuluft geöffnet, unten: Abluft geöffnet; Anströmrichtung  $0^\circ$ ;  $u = 3 \text{ m/s}$

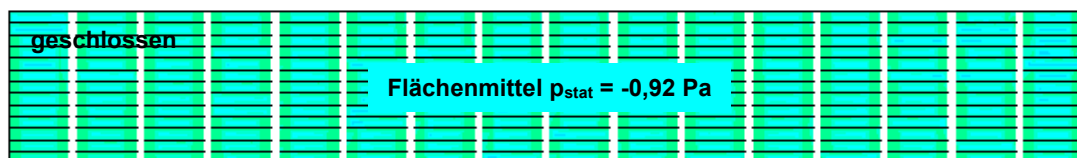
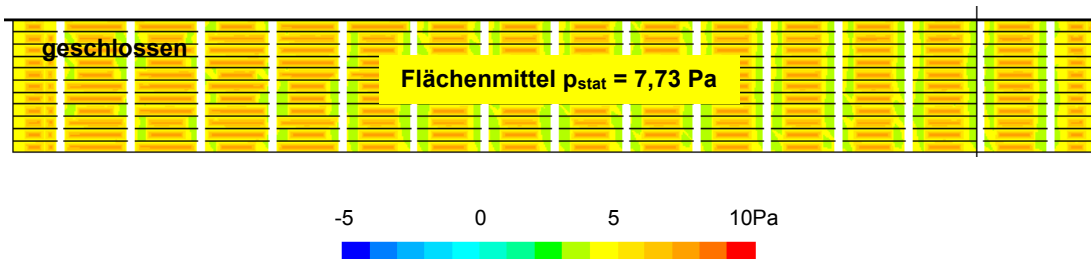


Bild 6.23: Verteilung des statischen Druckes im Bereich der Zu- und Abluftlamellen;  
oben: Zuluft geschlossen, unten: Abluft geschlossen; Anströmrichtung  $0^\circ$ ;  $u = 3 \text{ m/s}$

Werden die Druckverhältnisse sowohl an der Zu- wie auch an der Abluftfläche durch den Wind beeinflusst, liefert die Luftwechselberechnung nach der British Standard Method bei Verwendung der Druckdifferenz von geschlossenen Lüftungsflächen deutlich höhere Luftwechsel als die Simulation. Die Verwendung der Druckdifferenz der geöffneten Fassade stimmt hingegen im Berechnungsergebnis sehr gut mit den Simulationsergebnissen überein.

### 6.3.3 Luftaustauschwirkungsgrad

Neben der Ermittlung des Luftwechsels ermöglicht die Simulation auch die Bestimmung des Luftaustauschwirkungsgrades  $\eta_a$  ( $\rightarrow$  Kapitel 3.3), mit dem die vorhandene Strömungsform im Raum bewertet werden kann.

Mit Hilfe dieser Größe kann der Einfluss des Öffnungsanteils auf die Ausbildung der Raumluchtströmung untersucht werden. Die zur Berechnung erforderliche nominale Zeitkonstante wird aus dem Kehrwert des Luftwechsels (Volumenstrombilanz) bestimmt. Das mittlere Luftalter im Raum wird mit Hilfe einer UDF ( $\rightarrow$  Kapitel 6.1) berechnet.

$$\eta_a = \frac{\tau_n}{\tau_E} = \frac{\tau_n}{2 \cdot \bar{\tau}} \quad (6.2)$$

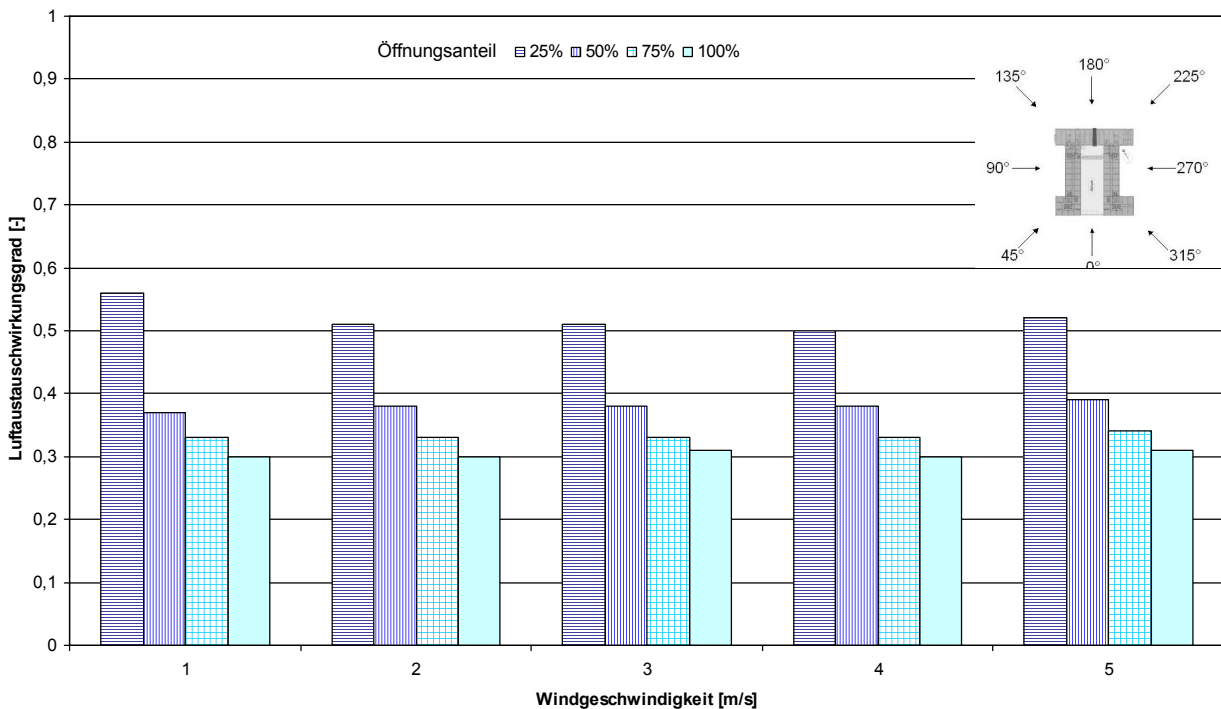
wobei  $\eta_a = 1$  bei idealer Verdrängungsströmung [-]

$1 > \eta_a > 0,5$  bei praktischer Verdrängungsströmung [-]

$\eta_a = 0,5$  bei vollständiger Mischströmung [-]

$0,5 > \eta_a > 0$  bei Kurzschlussströmung [-]

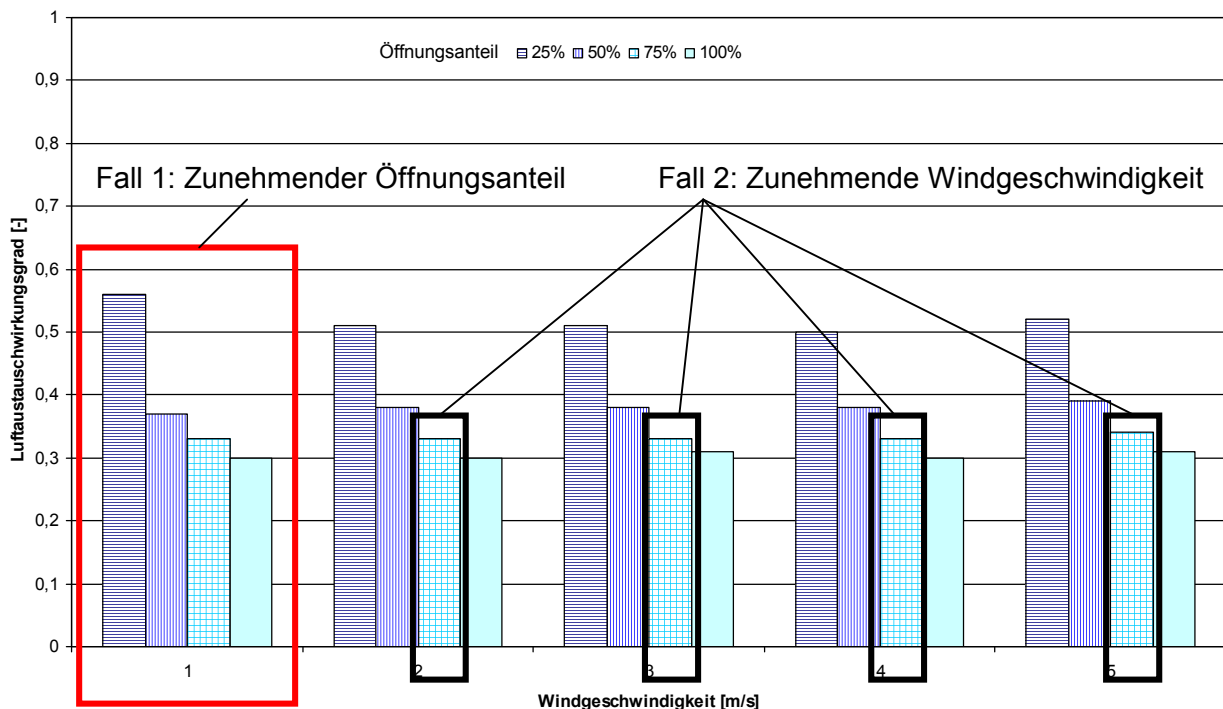
Bild 6.24 zeigt beispielhaft den Luftaustauschwirkungsgrad bei einer Anströmung aus  $0^\circ$  für Windgeschwindigkeiten von 1 bis 5 m/s. Die Größe der vorhandenen Zu- und Abluftflächen wird von 25 bis 100 % variiert.



**Bild 6.24:** Luftaustauschwirkungsgrad abhängig von der Windgeschwindigkeit und dem Öffnungsanteil der Zu- und Abluftfläche; Anströmrichtung  $0^\circ$

Die maximale Bruttoquerschnittsfläche der Zuluftöffnung beträgt 56,7 m<sup>2</sup>, die der Abluftöffnung 70,3 m<sup>2</sup>. Diese Werte entsprechen einem Öffnungsanteil von 100 % (inkl. der Lamellen). Bezogen auf die Grundfläche des Atriums entspricht die Bruttoquerschnittsfläche der Zuluftöffnung 4,8 % der Grundfläche, die Fläche der Abluft beträgt 6 %. Bei einem Öffnungsanteil von 50 % sind beide Flächen nur zur Hälfte geöffnet.

Es besteht offenbar ein direkter Zusammenhang zwischen dem Öffnungsanteil in der Fassade und der sich einstellenden Strömungsform im Raum, unabhängig von der Windgeschwindigkeit. Die Effizienz der Lüftung nimmt mit zunehmendem Öffnungsanteil ab (Bild 6.25: Fall 1), wobei der Luftaustauschwirkungsgrad bei gleichem Öffnungsanteil und zunehmender Windgeschwindigkeit konstant bleibt (Bild 6.25: Fall 2). Nachfolgend wird untersucht, wie sich die Raumluchtströmung bei zunehmenden Öffnungsanteil bzw. zunehmender Windgeschwindigkeit verändert. Bild 6.25 zeigt die entsprechenden Varianten.



**Bild 6.25:** Luftaustauschwirkungsgrad abhängig von der Windgeschwindigkeit und dem Öffnungsanteil der Zu- und Abluftfläche; Anströmrichtung 0°

Die Ergebnisse der Berechnungen des Luftaustauschwirkungsgrades für alle weiteren Anströmrichtungen sind im Anhang C zusammengestellt. Bei seitlicher und rückwärtiger Anströmung des Gebäudes treten in einigen Fällen etwas ungleichmäßigere Wirkungsgrade auf. Doch auch hier nehmen diese durchgehend mit zunehmender Öffnungsfläche ab.

### Fall 1: Zunehmender Öffnungsanteil

Mit zunehmender Öffnungsfläche sinkt der Luftaustauschwirkungsgrad von 0,56 bis auf 0,3, d.h. der Anteil der Kurzschlussströmung nimmt zu. Den Einfluss dieses Effektes auf die Raumluftströmung zeigt Bild 6.26. Hier ist die Verteilung des lokalen Luftalters im Raum für einen zunehmenden Öffnungsanteil bei einer konstanten Windgeschwindigkeit von 1 m/s dargestellt. Es sind deutliche Unterschiede in der Ausbildung der Raumluftströmung erkennbar (gleiche Skalierung).

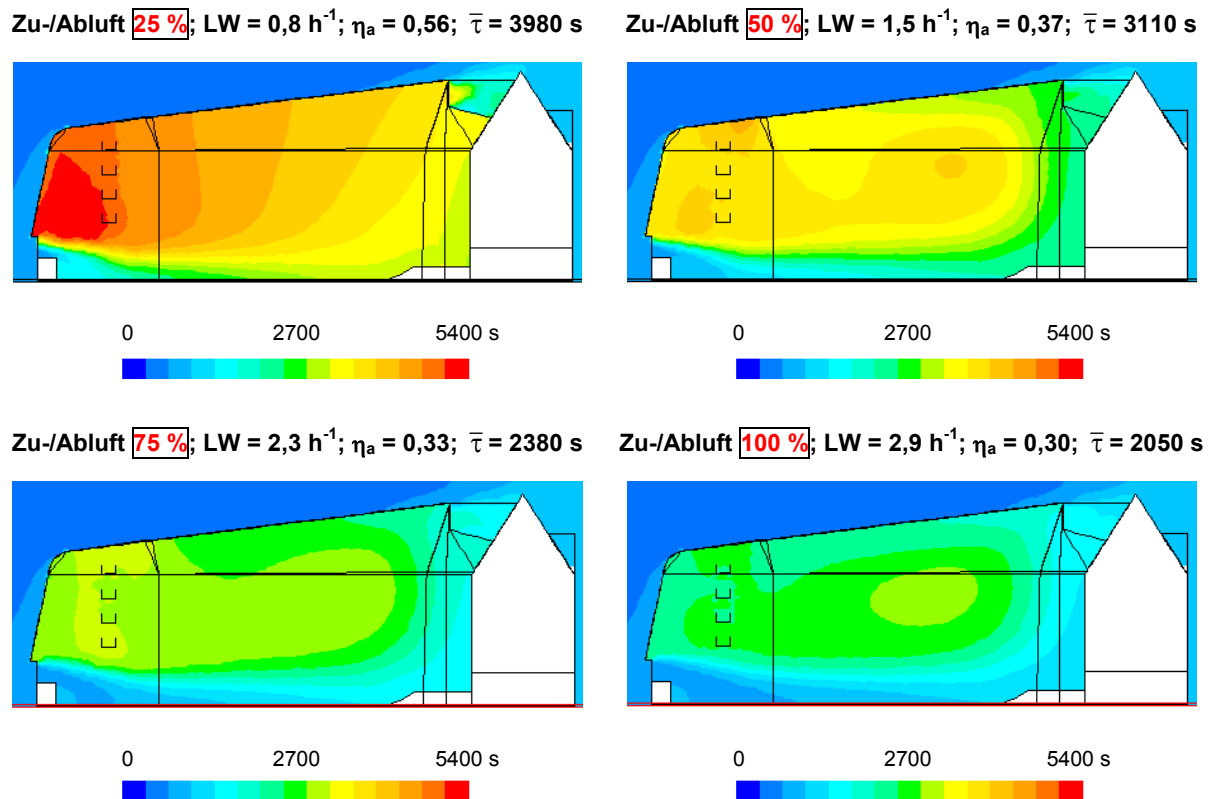


Bild 6.26: Verteilung des lokalen Luftalters bei zunehmendem Öffnungsanteil der Zu- und Abluftfläche; Anströmrichtung  $0^\circ$ , Windgeschwindigkeit 1 m/s

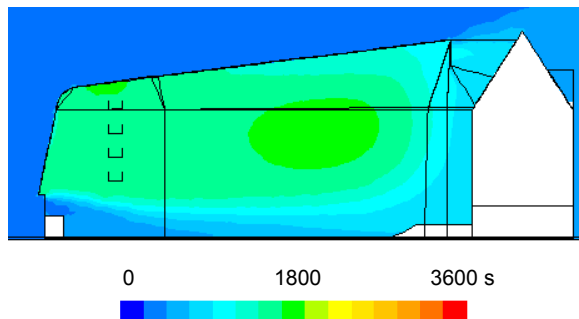
Durch die Vergrößerung des Lüftungsquerschnittes von 25 auf 100 % steigt der Luftwechsel bei gleicher Windgeschwindigkeit um das 3,6-fache an, das mittlere Luftalter hingegen wird lediglich halbiert, d.h. ein Großteil der Luft trägt nicht zur Durchlüftung des gesamten Raumvolumens bei; die Lüftungseffektivität nimmt ab. Am höchsten ist der Luftwechsel in Bodennähe, also in der Aufenthaltszone. Dies ist hinsichtlich der Luftqualität positiv zu bewerten, kann aber durch hohe Luftgeschwindigkeiten unter Umständen zu Beeinträchtigungen der Behaglichkeit führen. In der Mitte des Atriums wird die Luftqualität durch die Erhöhung des Luftwechsels nur geringfügig verbessert. Das bedeutet, dass eine Erhöhung des Raumlufwechsels durch die Vergrößerung der Lüftungsquerschnitte nicht zwangsläufig zu einer besseren Durchlüftung des gesamten Raumlufvolumens führt.



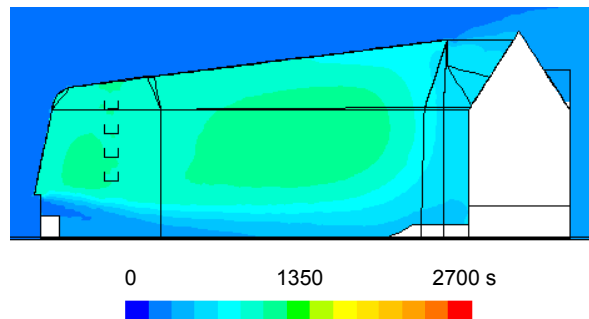
## Fall 2: Zunehmende Windgeschwindigkeit

Bei zunehmender Windgeschwindigkeit und gleichem Öffnungsanteil bleibt der Luftaustauschungsgrad im Gegensatz zu Fall 1 weitgehend konstant, d.h. der Luftwechsel ändert sich, aber die qualitative Verteilung des lokalen Luftalters bleibt konstant. Das nachfolgende Bild 6.27 zeigt am Beispiel der Anströmrichtung  $0^\circ$  die Verteilung des Luftalters im Raum bei einem Öffnungsanteil von jeweils 75 % und einer zunehmenden Windgeschwindigkeit von 2 bis 5 m/s. Der Luftwechsel liegt zwischen  $4,2 \text{ h}^{-1}$  und  $9,8 \text{ h}^{-1}$ . Trotz der unterschiedlichen Luftwechsel zeigt die qualitative Verteilung des Luftalters in allen Fällen einen ähnlichen Verlauf (unterschiedliche Skalierung).

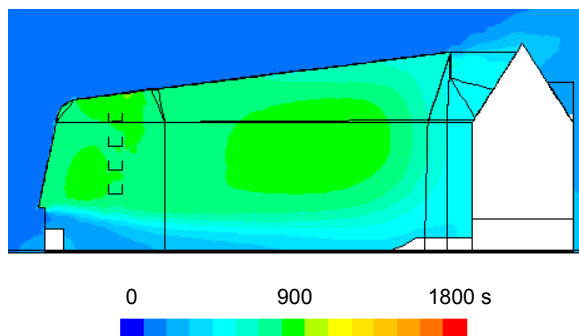
Zu-/Abluft 75 %;  $\text{LW} = 4,2 \text{ h}^{-1}$ ;  $\eta_a = 0,33$ ;  $\bar{\tau} = 1274 \text{ s}$ ;  
Windgeschwindigkeit **2 m/s**



Zu-/Abluft 75 %;  $\text{LW} = 6,1 \text{ h}^{-1}$ ;  $\eta_a = 0,33$ ;  $\bar{\tau} = 881 \text{ s}$ ;  
Windgeschwindigkeit **3 m/s**



Zu-/Abluft 75 %;  $\text{LW} = 8,0 \text{ h}^{-1}$ ;  $\eta_a = 0,33$ ;  $\bar{\tau} = 674 \text{ s}$ ;  
Windgeschwindigkeit **4 m/s**



Zu-/Abluft 75 %;  $\text{LW} = 9,8 \text{ h}^{-1}$ ;  $\eta_a = 0,34$ ;  $\bar{\tau} = 536 \text{ s}$ ;  
Windgeschwindigkeit **5 m/s**

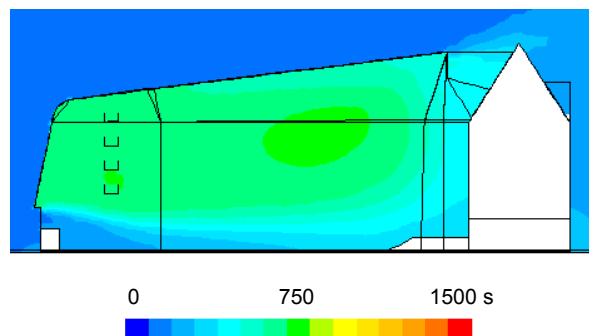
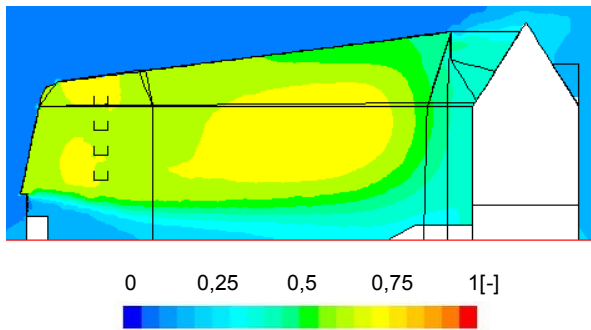


Bild 6.27: Verteilung des lokalen Luftalters bei konstantem Öffnungsanteil der Zu- und Abluftfläche; Anströmrichtung  $0^\circ$ , Windgeschwindigkeit 2 bis 5 m/s

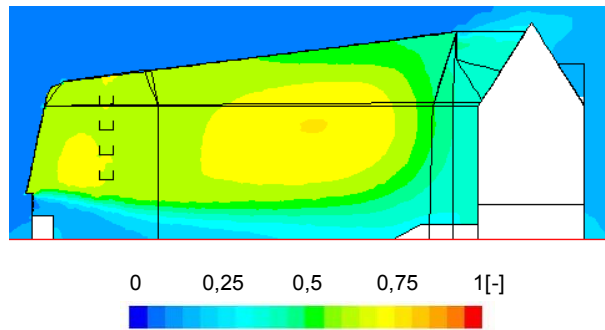
Um die Darstellungsunterschiede aufgrund der verschiedenen Skalierungen zu vermeiden, wird nachfolgend die qualitative Verteilung des lokalen Luftalters auf einen *lokalen Luftaustauschindex* von 0 bis max. 1 reduziert, indem die maximale Luftaustauschzeit als Referenzwert herangezogen wird. Bild 6.28 zeigt die Verteilung der lokalen Luftaustauschindizes bei konstantem Öffnungsanteil (75%) und zunehmender Windgeschwindigkeit am Beispiel der Anströmrichtung  $0^\circ$ . Die Verteilung der Luftaustauschindizes ist trotz völlig unterschiedlicher Luftwechsel in allen Fällen nahezu identisch. Die Angabe von Luftaustauschindizes ermöglicht somit eine von der Windgeschwindigkeit unabhängige

Bewertung des lokalen Luftalters. Dieser Index beschreibt, wie gut ein Raum im Vergleich zur Belüftung eines vollständig durchmischten System mit demselben Gesamtlüftungsstrom belüftet ist. Ein Luftaustauschindex von 0,3 bedeutet beispielsweise, dass das Luftalter an diesem Punkt im Raum 30 % der maximalen Luftaustauschzeit beträgt, bei einem max. Luftalter von z.B. 3600 s also 1080 s. Ein Luftaustauschindex von 0,5 entspricht dem mittleren Luftalter  $\bar{\tau}$ .

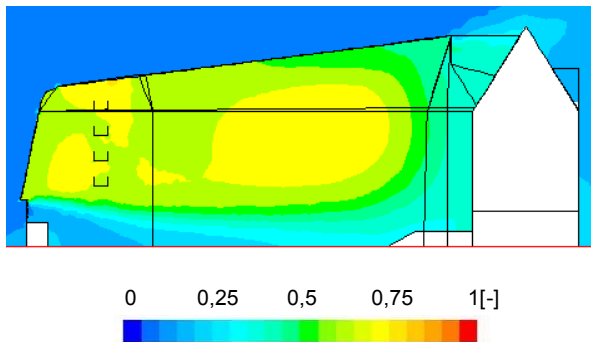
**Zu-/Abluft 75%; LW = 4,2 h<sup>-1</sup>;  $\eta_a = 0,33$ ;  $\bar{\tau} = 1274$  s;  
Windgeschwindigkeit 2 m/s**



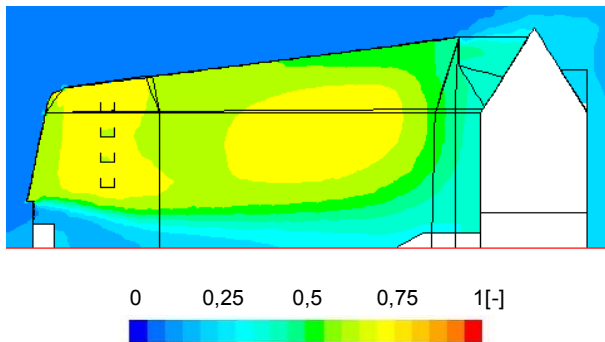
**Zu-/Abluft 75%; LW = 6,1 h<sup>-1</sup>;  $\eta_a = 0,33$ ;  $\bar{\tau} = 881$  s;  
Windgeschwindigkeit 3 m/s**



**Zu-/Abluft 75%; LW = 8,0 h<sup>-1</sup>;  $\eta_a = 0,33$ ;  $\bar{\tau} = 674$  s;  
Windgeschwindigkeit 4 m/s**



**Zu-/Abluft 75%; LW = 9,8 h<sup>-1</sup>;  $\eta_a = 0,34$ ;  $\bar{\tau} = 536$  s;  
Windgeschwindigkeit 5 m/s**



**Bild 6.28: Verteilung der lokalen Luftaustauschindizes bei konstantem Öffnungsanteil der Zu- und Abluftfläche; Anströmrichtung 0°, Windgeschwindigkeit 2 bis 5 m/s**

Die Luftaustauschzeit  $\tau_E$  ergibt sich aus der Beziehung  $\bar{\tau} = 0,5 \cdot \tau_E$ . Bei Kenntnis des Luftaustauschgrades und der lokalen Luftaustauschindizes kann das lokale Luftalter  $\bar{\tau}_p$  an jedem beliebigen Punkt im Raum nach Formel 6.3 für jeden Luftwechsel einfach berechnet werden.

$$\bar{\tau}_p = \tau_E \cdot \text{Luftaustauschindex [s]}; \text{ mit } \tau_E = 2 \cdot \bar{\tau} = \frac{1}{\eta_a} \cdot 3600 \text{ [s]} \quad (6.3)$$

$\bar{\tau}$	[s; h]	durchschnittliches Alter der Luft im Raum
$\tau_E$	[s; h]	Luftaustauschzeit
$\eta_a$	[-]	Luftaustauschwirkungsgrad
$\bar{\tau}_p$	[s; h]	lokales Alter der Luft

## 7 Vergleich Messung – Simulation – Berechnung nach BSM

Um die Ergebnisse der Luftwechseluntersuchungen zu bewerten, wird der Luftwechsel unter Versuchsrandbedingungen nachfolgend simuliert. Da die reale Windgeschwindigkeit während der Messungen leichten Schwankungen unterlag, wird das Diagramm zur Ermittlung des Luftwechsels aus Kapitel 6.3 zur Bestimmung einer durchschnittlichen Windgeschwindigkeit angewendet. Die Windgeschwindigkeit aus der entsprechenden Anströmrichtung wird als Randbedingung vorgegeben. Der aus der Simulation ermittelte Luftwechsel wird mit dem Ergebnis der Luftwechseluntersuchung verglichen. Weiterhin wird der Luftwechsel mit Hilfe der British Standard Method nach Formel 3.7 bzw. 3.8 ermittelt. Die wirksame Druckdifferenz wird aus den Ergebnissen der Simulation bestimmt. Sie wird aus den Flächenmitteln der statischen Druckverteilung im Bereich der geöffneten Zu- und Abluftöffnung berechnet.

### 7.1 Luftwechseluntersuchung in der Übergangszeit

Bei der Luftwechseluntersuchung im Mai kam der Wind aus süd-/südöstlicher Richtung. Das entspricht einer Anströmung aus  $315^\circ$  gemäß der Definition der Anströmrichtungen nach Bild 6.15. Bei einer Windgeschwindigkeit von 2 bis 3 m/s und 100 % geöffneten Fassade ergibt dies aus dem Diagramm einen Luftwechsel zwischen 5,8 und 8,5  $\text{h}^{-1}$ .

Die Luftwechseluntersuchung ergab am Magazindach und am Geländer der Atriumtreppe einen Luftwechsel von 6,6  $\text{h}^{-1}$ , der gem. Diagramm bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 2,3 m/s erreicht wird. Im Bereich der Brücke im 5.OG war der Luftwechsel mit 5,1  $\text{h}^{-1}$  etwa 23 % niedriger. Der Luftaustauschwirkungsgrad bei 100 % Öffnungsanteil beträgt 0,38 (siehe Bild C 8, Anhang C).

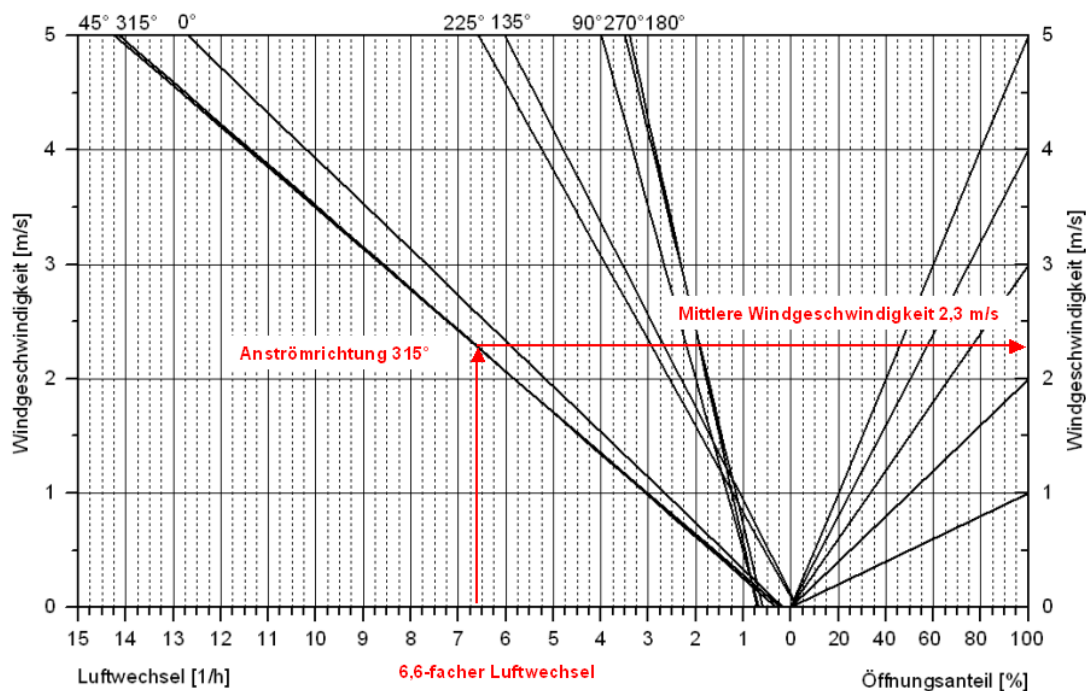


Bild 7.1: Diagramm zur Ermittlung des Luftwechsels als Funktion der Windrichtung, der Windgeschwindigkeit und der geöffneten Fensterfläche

Um die Verteilung des lokalen Luftalters im Raum zu ermitteln, wird der Luftwechsel im Atrium mit einer Windgeschwindigkeit von 2,3 m/s bei einer Anströmung aus 315° simuliert.

Ergebnis:

Die Simulation ergab bei den vorgegebenen Randbedingungen einen 6,7-fachen Luftwechsel. Dies entspricht nahezu dem Ergebnis der Luftwechseluntersuchung in der Übergangszeit ( $6,6 \text{ h}^{-1}$ ).

Mit Hilfe des Luftaustauschwirkungsgrades und des Luftwechsels kann die maximale Luftaustauschzeit berechnet werden. Bei einem Luftwechsel von  $6,7 \text{ h}^{-1}$  und einem Luftaustauschwirkungsgrad von 0,38 beträgt nach Kapitel 6.3.3 die theoretische Luftaustauschzeit  $\tau_E = 1414 \text{ s}$  bei einem mittleren Luftalter von 707 s.

Das mittlere Luftalter aus der Simulation stimmt mit einem Wert von 711 s gut mit dem berechneten Ergebnis von 707 s überein.

Die Luftaustauschindices am Magazindach und an der Atriumtreppe betragen jeweils 0,49, an der Brücke im 5.OG liegt der Index bei 0,6, also um 24 % höher (siehe Bild 7.3, rechts). Mit Hilfe dieser Werte können lokale Luftalter für verschiedene Luftwechsel berechnet werden.

Für das nachfolgend dargestellte Beispiel mit einem Luftwechsel von  $6,7 \text{ h}^{-1}$  beträgt das berechnete lokale Luftalter am Magazindach und an der Atriumtreppe  $0,49 \cdot 1414 \text{ s} = 693 \text{ s}$ , an der Brücke ist es mit  $0,6 \cdot 1414 \text{ s} = 848 \text{ s}$  etwas höher. Auch diese Werte stimmen sehr gut mit der in Bild 7.3 links dargestellten Verteilung des lokalen Luftalters überein.

Die im Rahmen der Luftwechseluntersuchung erzielten Ergebnisse hinsichtlich der lokalen Luftwechsel an den Messpunkten wurden durch die Simulation bestätigt.

Die nachfolgenden Bilder zeigen die horizontale Verteilung des lokalen Luftalters und des Luftaustauschindexes. Die Ebenen liegen auf Höhe der Messpunkte bei der Luftwechseluntersuchung. Die Lage der horizontalen Darstellungsebenen im zeigt Bild 7.2.

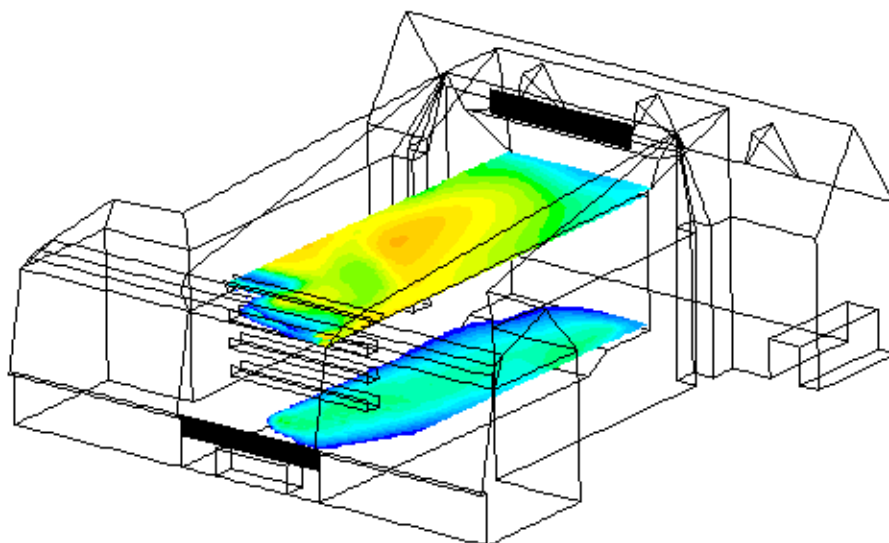


Bild 7.2: Lage der horizontalen Darstellungsebenen in 3 m, 19 m und 20 m Höhe

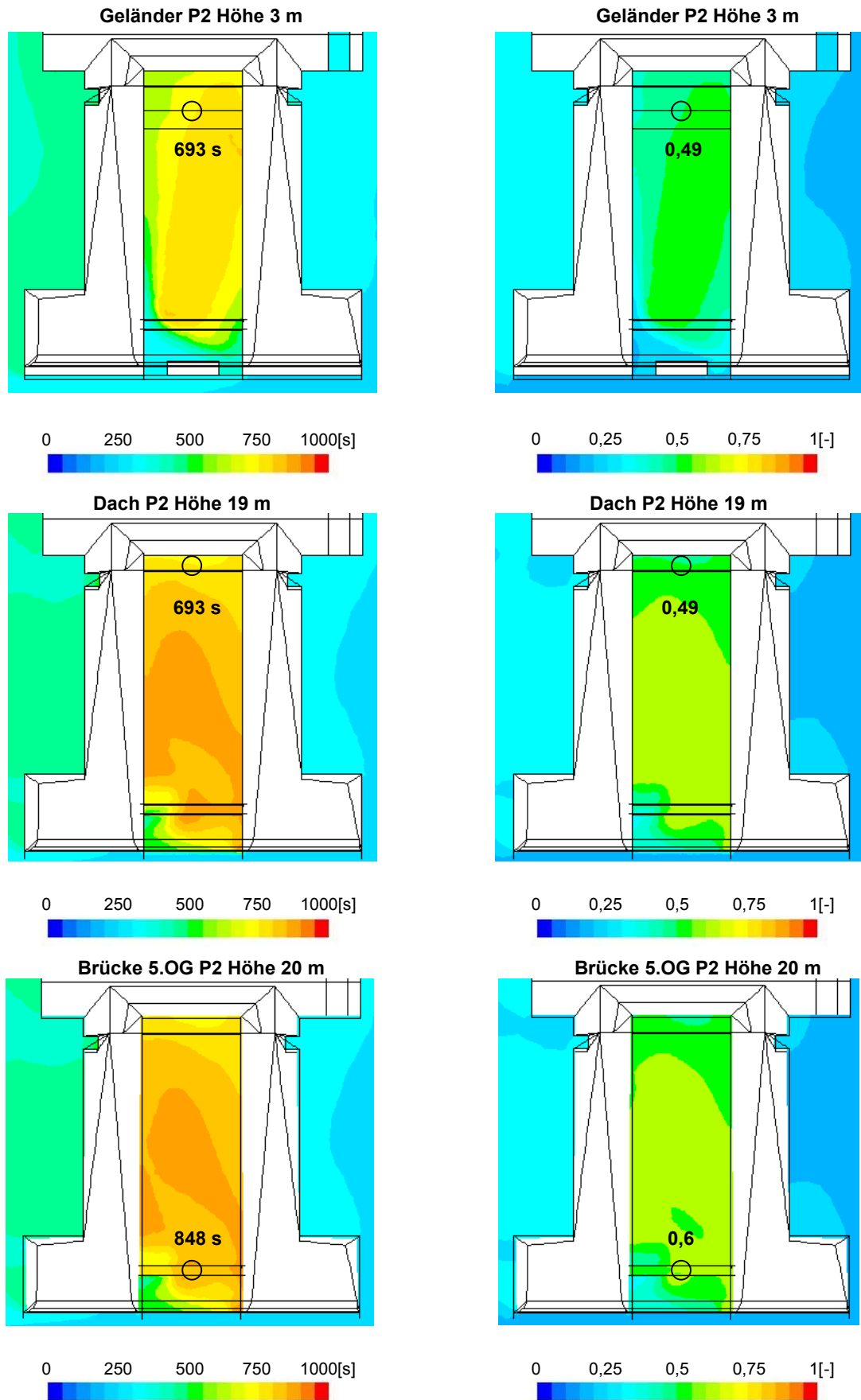


Bild 7.3: Verteilung des lokalen Luftalters (links) und des Luftaustauschindex (rechts) in 3 m, 19 m und 20 m Höhe; Windgeschwindigkeit 2,3 m/s; Anströmrichtung 315°

**Berechnung nach British Standard Method (Kapitel 3.4):** Bei der Messung war eine geringe Temperaturdifferenz zwischen innen und außen vorhanden. Nach Formel 3.8 ergibt diese bei einer mittleren Temperatur von 294 K einen thermisch induzierten Luftwechsel von:

Temperaturdifferenz 1 K:  $n = 3,8 \text{ h}^{-1}$

Temperaturdifferenz 2 K:  $n = 5,4 \text{ h}^{-1}$

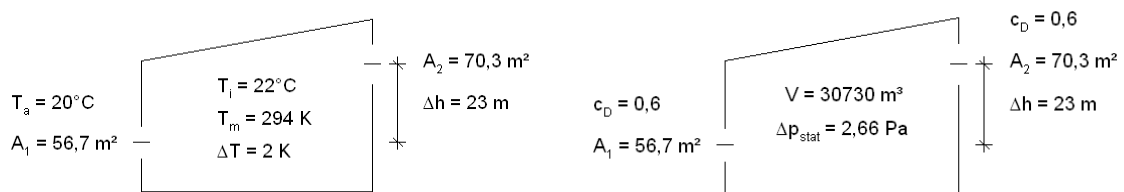


Bild 7.4: Darstellung der Randbedingungen für die Berechnungen nach British Standard Method

Die Druckdifferenz zwischen geöffneten Zu- und Abluftlamellen beträgt 2,66 Pa (siehe Bild 7.5). Daraus folgt bei einer Windgeschwindigkeit von 2,3 m/s nach Formel 3.7 ein windinduzierter Luftwechsel von  $6,53 \text{ h}^{-1}$ . Das Ergebnis der Luftwechseluntersuchung wird auch hierdurch bestätigt.

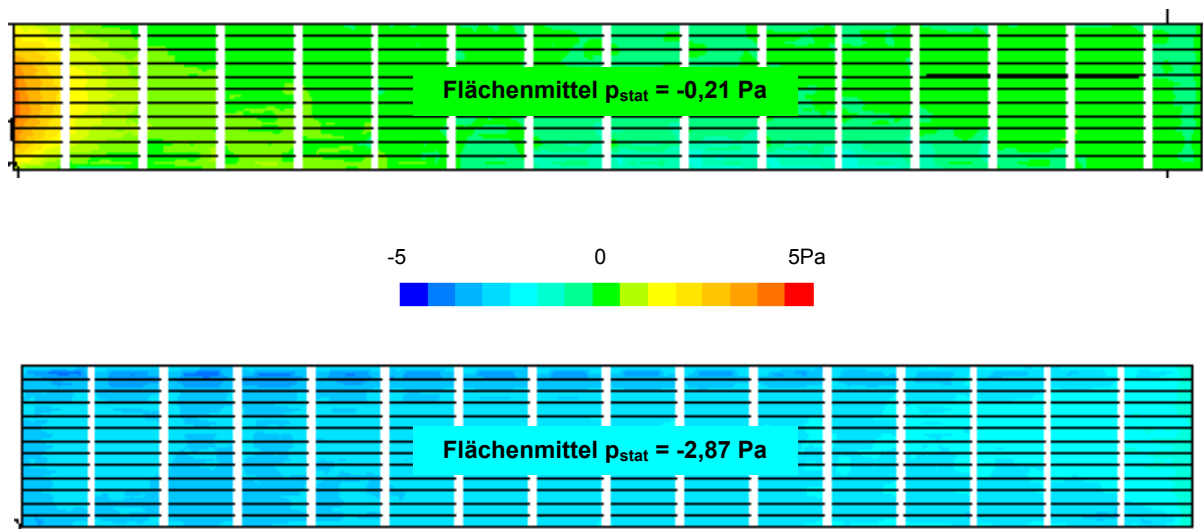


Bild 7.5: Verteilung des statischen Druckes im Bereich der geöffneten Zu- und Abluftlamellen;  
oben: Zuluft, unten: Abluft; Anströmrichtung 315°;  $u = 2,3 \text{ m/s}$

Gemäß British Standard Method überwiegt in Abhängigkeit der äußeren Randbedingungen entweder der windinduzierte *oder* der thermisch induzierte Luftwechsel, in diesem Fall also der windinduzierte. Bei einer additiven Überlagerung der beiden Effekte müsste der Luftwechsel zwischen  $10,4$  und  $12 \text{ h}^{-1}$  liegen.

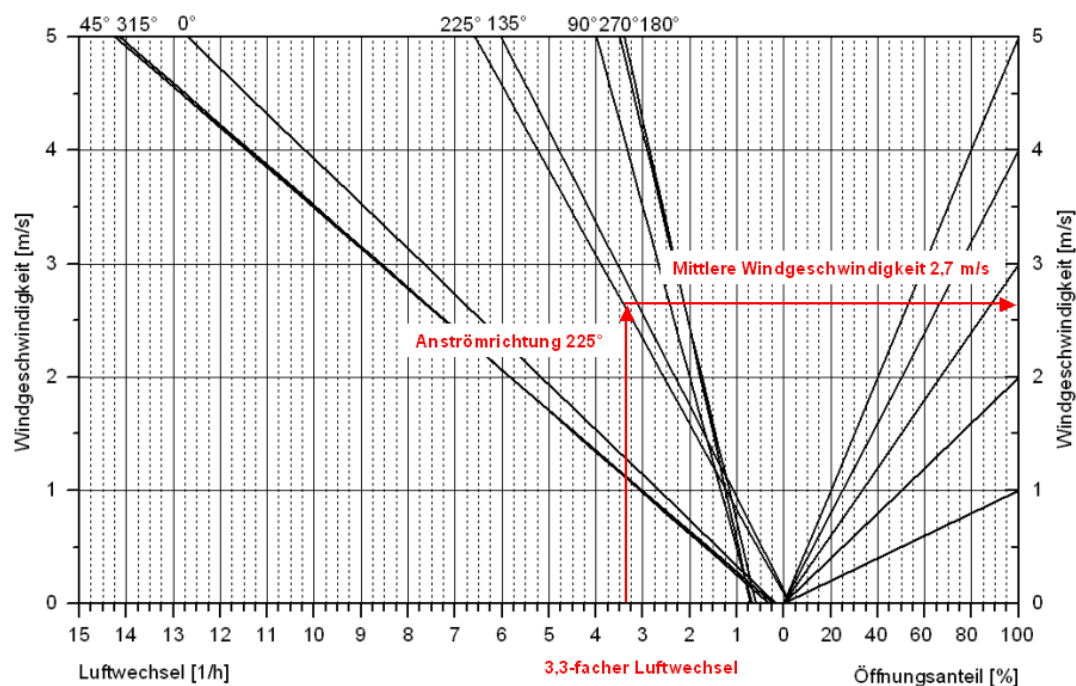
Ergebnis	Versuch	Simulation	Berechnung nach BSM	
			windinduziert	temperaturinduziert
Luftwechsel	[1/h]	[1/h]	[1/h]	[1/h]
Übergang	6,6	6,7	6,5	3,8 bis 5,4

Tabelle 7.1: Ergebnisse der Luftwechselbestimmung aus Versuch, Simulation und Berechnung

## 7.2 Luftwechseluntersuchung im Sommer

Bei der Luftwechseluntersuchung im August kam der Wind aus östlicher Richtung. Das entspricht einer Anströmung aus  $225^\circ$  gemäß der Definition der Anströmrichtungen nach Bild 6.15. Bei einer Windgeschwindigkeit von 2 bis 3 m/s und 100 % geöffneter Fassade ergibt dies aus dem Diagramm einen Luftwechsel zwischen 2,5 und  $3,8 \text{ h}^{-1}$ .

Die Luftwechseluntersuchung ergab am Magazindach einen Gesamtraumluftwechsel von  $3,3 \text{ h}^{-1}$ , der gem. Diagramm bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 2,7 m/s erreicht wird. Im Bereich der Brücke im 5.OG schwankt der Luftwechsel zwischen 3,5 bis  $4,8 \text{ h}^{-1}$ . Der Luftaustauschwirkungsgrad beträgt im Mittel 0,45 für die Windgeschwindigkeiten von 2 bzw. 3 m/s (siehe Bild C 6, Anhang C).



**Bild 7.6:** Diagramm zur Ermittlung des Luftwechsels als Funktion der Windrichtung, der Windgeschwindigkeit und der geöffneten Fensterfläche

Um die Verteilung des lokalen Luftalters im Raum zu ermitteln, wird der Luftwechsel im Atrium mit einer Windgeschwindigkeit von 2,7 m/s bei einer Anströmung aus  $225^\circ$  simuliert.

Ergebnis:

Die Simulation ergab bei den vorgegebenen Randbedingungen einen 3,3-fachen Luftwechsel. Dies entspricht dem Ergebnis der Luftwechseluntersuchung im Sommer ( $3,3 \text{ h}^{-1}$ ).

Mit Hilfe des Luftaustauschwirkungsgrades und des Luftwechsels kann die maximale Luftaustauschzeit berechnet werden. Bei einem Luftwechsel von  $3,3 \text{ h}^{-1}$  und einem Luftaustauschwirkungsgrad von 0,45 beträgt nach Kapitel 6.3.3 die theoretische Luftaustauschzeit  $\tau_E = 2424 \text{ s}$  bei einem mittleren Luftalter von 1212 s.

---

Das mittlere Luftalter aus der Simulation stimmt mit einem Wert von 1207 s gut mit dem berechneten Ergebnis von 1212 s überein.

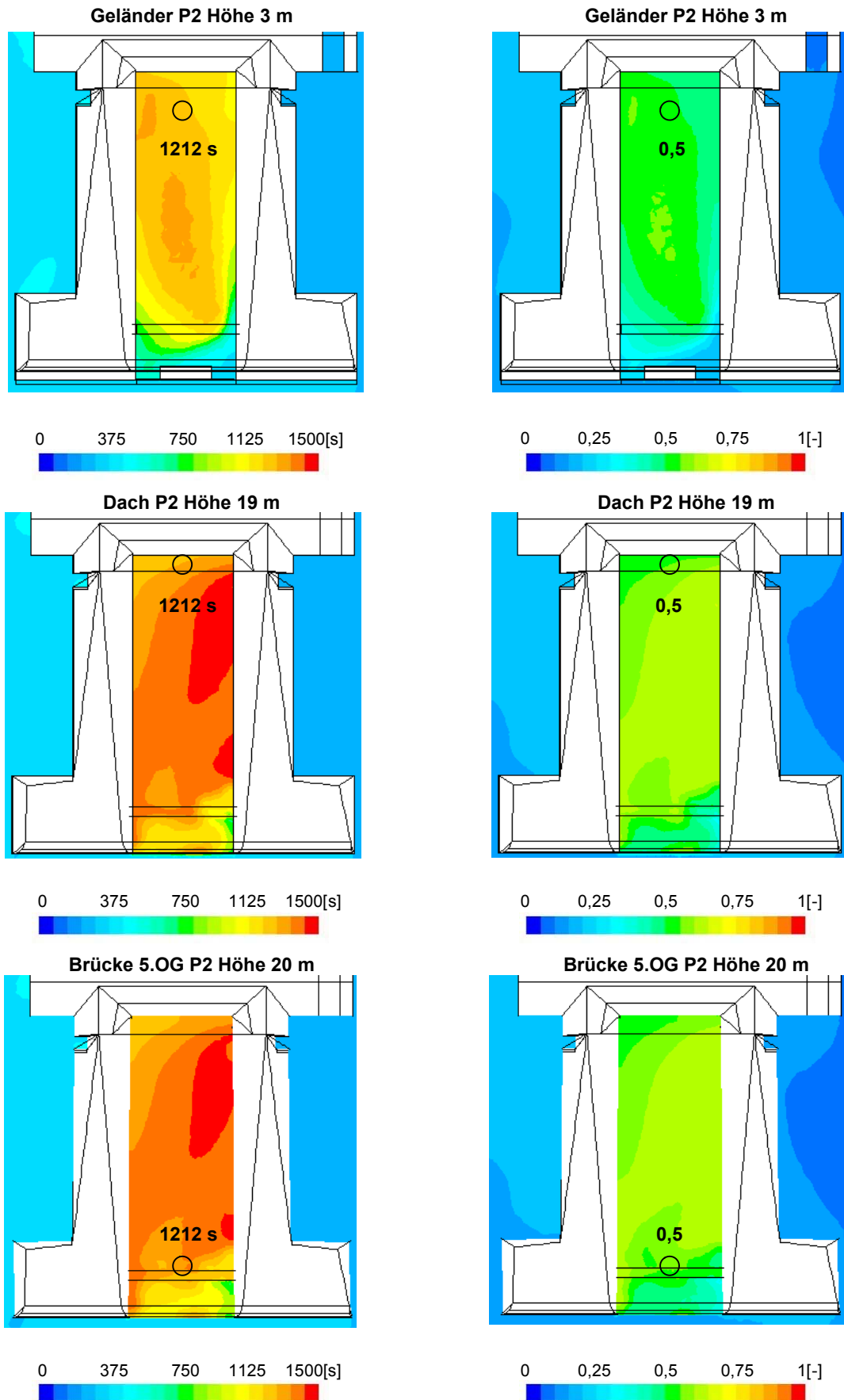
Die Luftaustauschindices am Magazindach, an der Atriumtreppe und an der Brücke im 5.OG betragen jeweils 0,5 (siehe Bild 7.7, rechts). Mit Hilfe dieser Werte können lokale Luftalter für verschiedene Luftwechsel berechnet werden.

Für das nachfolgend dargestellte Beispiel mit einem Luftwechsel von  $3,3 \text{ h}^{-1}$  beträgt das berechnete lokale Luftalter  $0,5 \cdot 2424 \text{ s} = 1212 \text{ s}$ . Auch dieser Wert stimmt sehr gut mit der in Bild 7.7 links dargestellten Verteilung des lokalen Luftalters überein.

Die im Rahmen der Luftwechseluntersuchung erzielten Ergebnisse hinsichtlich der lokalen Luftwechsel an den Messpunkten wurden durch die Simulation bestätigt.

Die Lage der horizontalen Darstellungsebenen entspricht Bild 7.2. Die nachfolgenden Bilder zeigen die horizontale Verteilung des lokalen Luftalters und des Luftaustauschindex in Höhe der Messpunkte bei der Luftwechseluntersuchung. Die Messpunkte sind gekennzeichnet.





**Bild 7.7:** Verteilung des lokalen Luftalters (links) und des Luftaustauschindexes (rechts) in 3 m, 19 m und 20 m Höhe; Windgeschwindigkeit 2,7 m/s; Anströmrichtung 225°

**Berechnung nach British Standard Method (Kapitel 3.4):** Bei dieser Messung betrug die Temperaturdifferenz zwischen innen und außen zwischen 3 und 4 K. Nach Formel 3.8 ergibt dies bei einer mittleren Temperatur von 300 K einen thermisch induzierten Luftwechsel von:

Temperaturdifferenz 3 K:  $n = 6,6 \text{ h}^{-1}$

Temperaturdifferenz 4 K:  $n = 7,6 \text{ h}^{-1}$

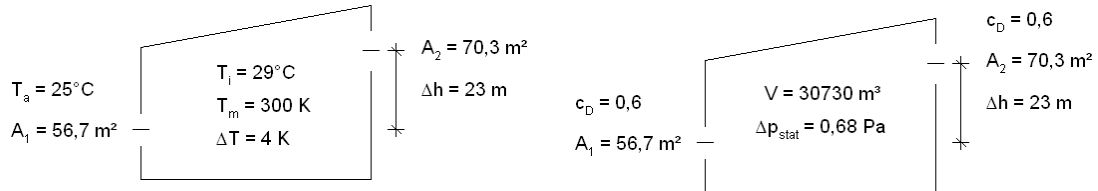


Bild 7.8: Darstellung der Randbedingungen für die Berechnungen nach British Standard Method

Die Druckdifferenz zwischen geöffneten Zu- und Abluftlamellen beträgt 0,68 Pa (siehe Bild 7.9). Daraus folgt bei einer Windgeschwindigkeit von 2,7 m/s nach Formel 3.7 ein Luftwechsel von  $3,3 \text{ h}^{-1}$ . Das Ergebnis der Luftwechseluntersuchung wird hierdurch bestätigt.

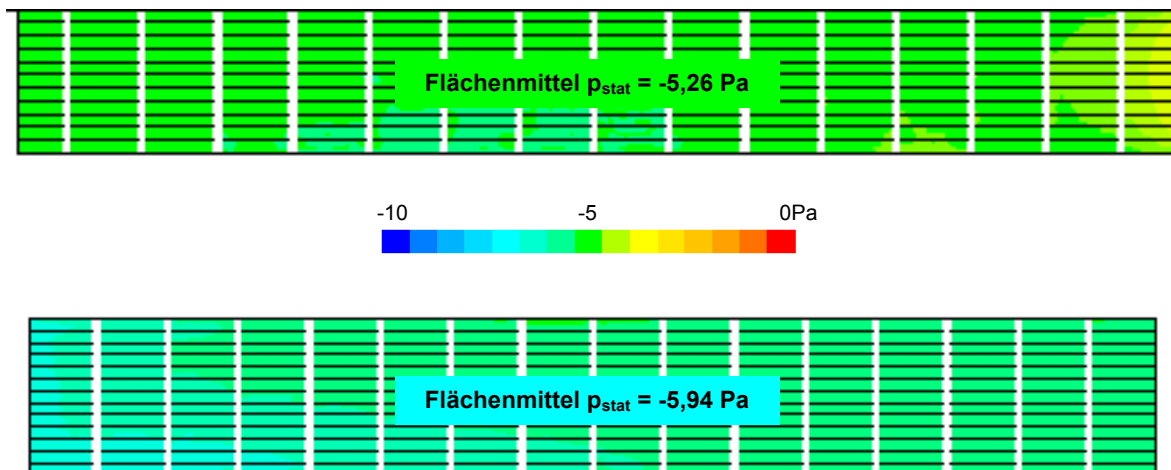


Bild 7.9: Verteilung des statischen Druckes im Bereich der geöffneten Zu- und Abluftlamellen; oben: Zuluft, unten: Abluft; Anströmrichtung 225°;  $u = 2,7 \text{ m/s}$

Auch in diesem Fall überwiegt der windinduzierte Luftwechsel, obwohl aufgrund der Temperaturdifferenz ein insgesamt höherer Luftwechsel zu erwarten wäre. Die Anströmung aus östlicher Richtung (225°) führt offenbar zu Druckverhältnissen im Bereich der Zu- und Abluftlamellen, die dem Einfluss der Thermik entgegenwirken.

Ergebnis	Versuch	Simulation	Berechnung nach BSM	
			windinduziert	temperaturinduziert
Luftwechsel	[1/h]	[1/h]	[1/h]	[1/h]
Sommer	3,3 bis 3,4	3,3	3,3	6,6 bis 7,6

Tabelle 7.2: Ergebnisse der Luftwechselbestimmung aus Versuch, Simulation und Berechnung

### 7.3 Luftwechseluntersuchung im Winter

Im Gegensatz zu den vorangegangenen Untersuchungen ist der Luftwechsel im Winter auf die große Temperaturdifferenz zurückzuführen. Eine Abschätzung des zu erwartenden Raumlufwechsels infolge Thermik liefert Formel 3.8. Die Berechnung ergibt bei einer mittleren Temperatur von 278 K einen thermisch induzierten Luftwechsel von:

Temperaturdifferenz 16 K:  $n = 15,8 \text{ h}^{-1}$   
 Temperaturdifferenz 11 K:  $n = 13,1 \text{ h}^{-1}$   
 Temperaturdifferenz 7 K:  $n = 10,4 \text{ h}^{-1}$

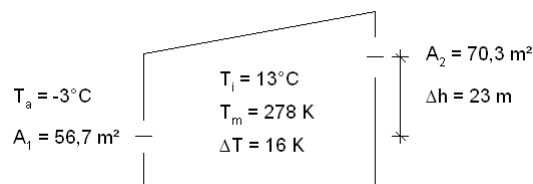


Bild 7.10: Darstellung der Randbedingungen für die Berechnung nach BSM ( $c_D = 0,6$ )

Die maßgebliche Temperaturdifferenz während des Abklingversuches beträgt etwa 10 bis 12 K (Mitteltemperatur Messfühler 2. und 5. OG), d.h. gem. Berechnung sollte der Luftwechsel bei etwa  $13 \text{ h}^{-1}$  liegen. Bei der Luftwechseluntersuchung wurde allerdings nur ein etwa 10-facher Luftwechsel ermittelt. Die Temperaturverteilung im Atrium wird daher im Rahmen einer instationären Simulation für einen 10-fachen Luftwechsel genauer betrachtet.

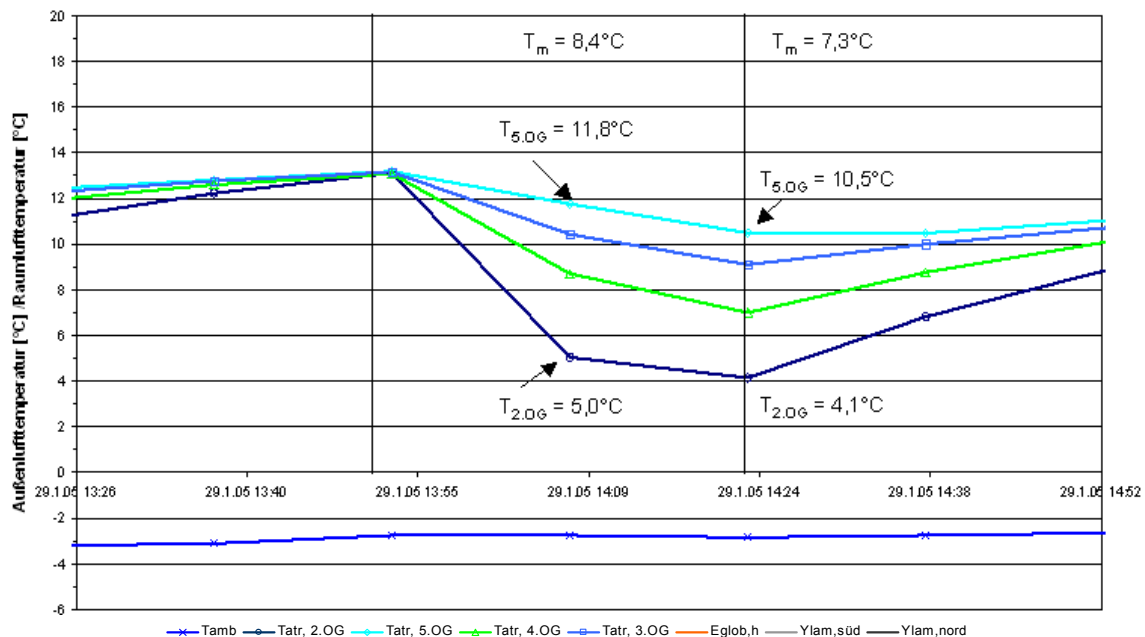
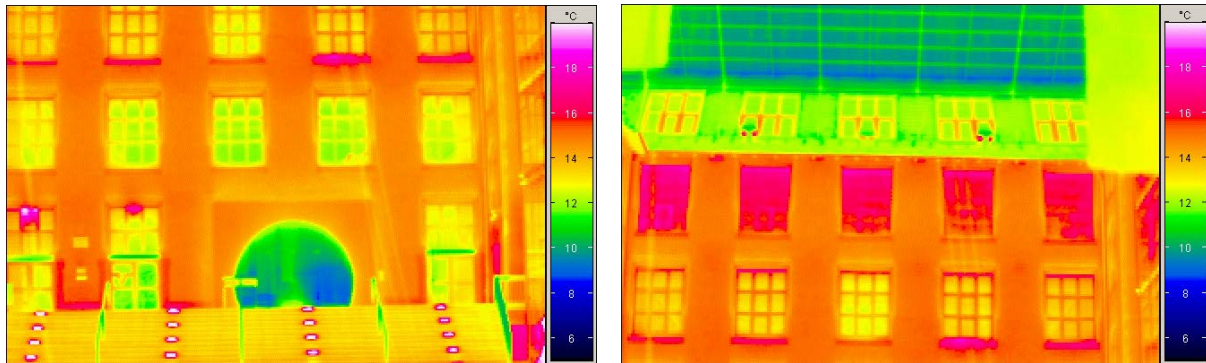


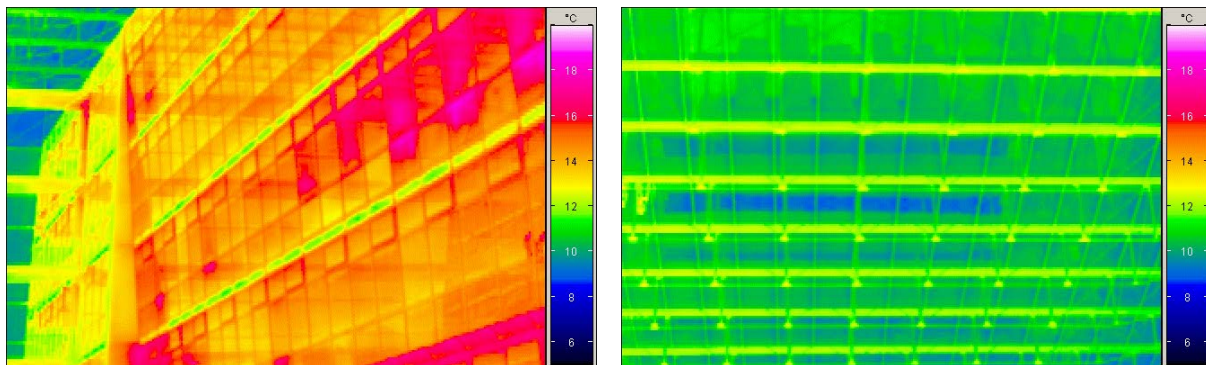
Bild 7.11: Raumlufthtemperaturverlauf im Atrium während der Messung

Um die Randbedingungen möglichst realistisch abzubilden, wurden die Oberflächentemperaturen bei der Messung im Winter mit Hilfe einer Thermografiekamera aufgenommen.

Die Ergebnisse dieser Aufnahmen sind in Bild 7.12 und Bild 7.13 dargestellt. Die Oberflächentemperaturen der angrenzenden beheizten Gebäudeteile liegen bei 14 bis 15°C, die der Glasflächen der Südfassade und des Daches bei 10 bis 11°C.

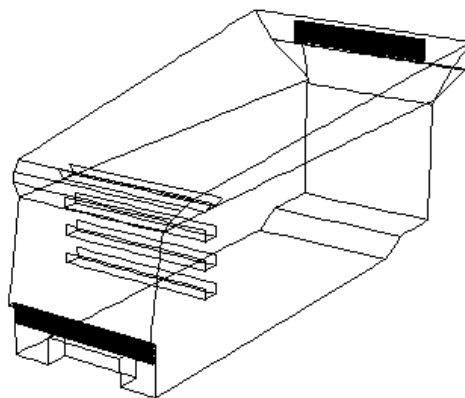


**Bild 7.12: Thermografieaufnahme des Magazingebäudes (Innenansicht Atrium)**



**Bild 7.13: Thermografieaufnahme der Seitenwand und des Daches (Innenansicht Atrium)**

Um den Rechenaufwand zu reduzieren, wird ein Teilmodell des Atriums ohne Außenumgebung verwendet, das in Bild 7.14 dargestellt ist. Das Teilmodell entspricht dem Atrium des Gebäudemodells aus der Parameterstudie.



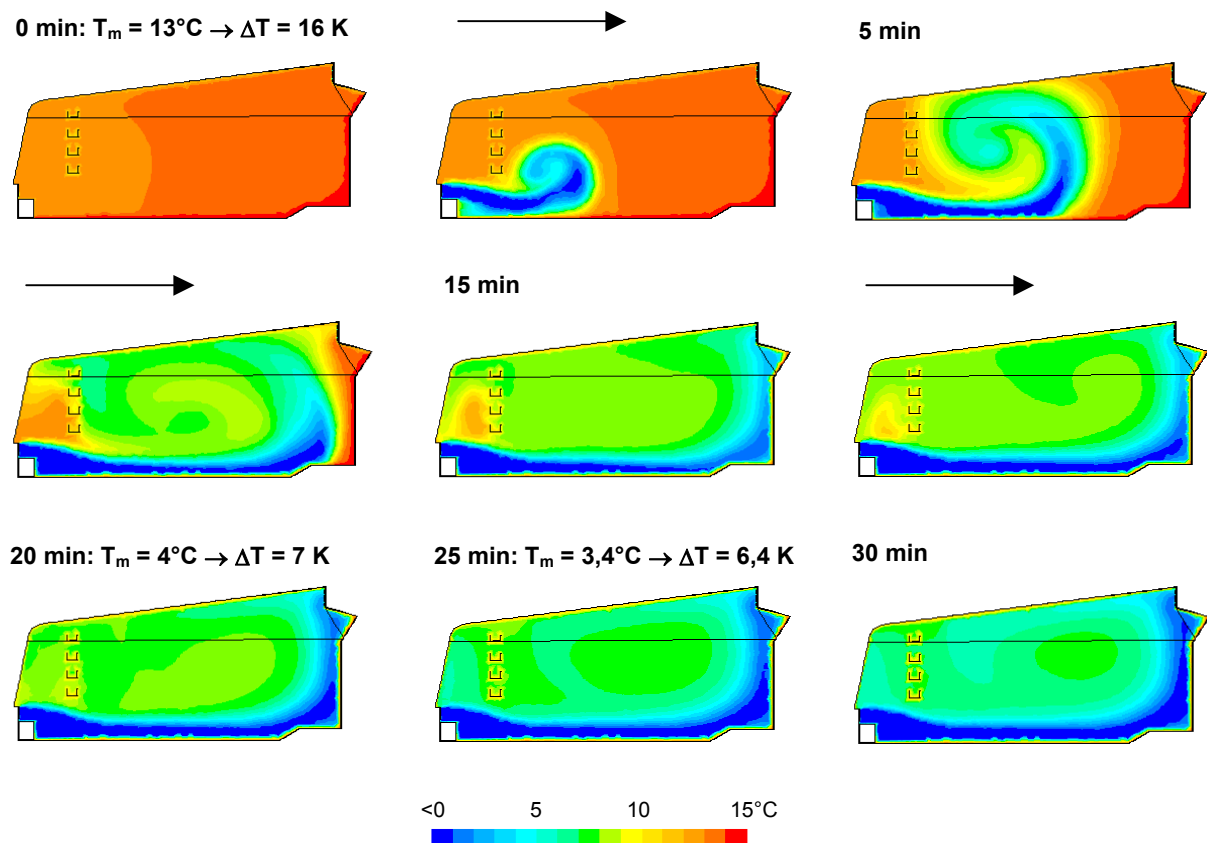
**Bild 7.14: Atriumteilmodell ohne angrenzende Gebäudeteile**

Die Dauer des Abklingversuches wird über einen Zeitraum von 30 Minuten instationär berechnet. Die Zulufttemperatur entspricht der Außentemperatur, die zum Zeitpunkt der Messung bei -3°C lag. Die Innenraumlufttemperatur beträgt zu Beginn konstant 13°C. Als

Randbedingung wird ein 10-facher Luftwechsel vorgegeben ( $\rightarrow$  Luftwechseluntersuchung Winter). Bild 7.15 zeigt den instationären Verlauf der Raumlufthtemperatur über einen Zeitraum von 30 Minuten. Es bildet sich eine ausgeprägte Kaltluftwalze entlang des Bodens, die an der Wand des Magazinegebäudes Richtung Abluftöffnung aufsteigt. Die weitere Durchmischung des Atriums mit kalter Außenluft tritt verzögert ein.

Bereits nach 20 Minuten beträgt die Mitteltemperatur im Atrium nur noch  $4^{\circ}\text{C}$  und die maßgebliche Temperaturdifferenz zwischen innen und außen ( $-3^{\circ}\text{C}$ ) damit 7 K.

Zu diesem Zeitpunkt liegt der Mittelwert der Atriumtemperaturmessfühler bei  $8,4^{\circ}\text{C}$ , also um 4,4 K höher. Die maßgebliche Temperaturdifferenz zwischen innen und außen beträgt in diesem Fall 11,4 K (Bild 7.11). Lediglich der Temperaturfühler an der Brücke im 2.OG reagiert direkt auf die einströmende Kaltluft.



**Bild 7.15: Instationärer Temperaturverlauf im Atrium während des Abklingversuches (Längsschnitt in Raummitte)**

Die Atriummitteltemperatur aus den Temperaturfühlern an den Atriumbrücken ist nicht zur Berechnung des thermisch induzierten Luftwechsels nach der British Standard Method geeignet, da sie zu hohe Werte liefert. Die tatsächliche Temperaturdifferenz von 7 K liefert einen thermisch induzierten Luftwechsel von  $10,4 \text{ h}^{-1}$ . Dieser Wert entspricht nahezu dem Ergebnis der Luftwechseluntersuchung. Bei Verwendung der korrekten Mitteltemperatur liefert die Berechnung nach der British Standard Method auch bei der Bestimmung des thermisch induzierten Luftwechsels sehr gute Ergebnisse.

## 7.4 Durchschnittlicher windinduzierter Luftwechsel

Nach der British Standard Method [BS 5925] hängt der Luftwechsel bei Querlüftung unter gleichzeitiger Einwirkung von Wind und Thermik von den Faktoren der zusammenhängenden Größen Windgeschwindigkeit, Temperaturdifferenz, Höhendifferenz und Druckbeiwertdifferenz ab. In Tabelle 7.3 wurden diese Faktoren gem. Gleichung 3.9 und 3.10 für relevante Parameter des untersuchten Atriums ausgewertet. Bereits bei Windgeschwindigkeiten von 2 m/s überwiegt bis zu einer Temperaturdifferenz von 4 K und einer Druckbeiwertdifferenz von beispielsweise 1,5 der Windeinfluss. Die rot markierten Zellen definieren den Bereich, in dem der temperaturinduzierte Luftwechsel überwiegt, die grünen Zellen stellen einen Übergangsbereich dar, die weißen Zellen bedeuten windinduzierten Luftwechsel.

Temperaturdifferenz $\Delta T$	$\Delta T$ [K]	$\Delta T$ [K]	$\Delta T$ [K]	$\Delta T$ [K]	$\Delta T$ [K]
Windgeschwindigkeit u	1	2	3	4	5
[m/s]	$\frac{u}{\sqrt{\Delta T}}$	$\frac{u}{\sqrt{\Delta T}}$	$\frac{u}{\sqrt{\Delta T}}$	$\frac{u}{\sqrt{\Delta T}}$	$\frac{u}{\sqrt{\Delta T}}$
1	1,0	0,71	0,58	0,50	0,45
2	2,0	1,41	1,15	1,0	0,89
3	3,0	2,12	1,73	1,50	1,34
4	4,0	2,83	2,31	2,0	1,79
5	5,0	3,54	2,89	2,5	2,24
6	6,0	4,24	3,46	3,0	2,68
$\Delta c_p$	0,5	0,75	1	1,25	1,5
$0,26 \cdot \sqrt{\frac{\Delta h}{\Delta c_p}}$ $\Delta h = 23\text{m}$	1,76	1,44	1,25	1,12	1,0

Tabelle 7.3: Luftwechsel infolge Wind bzw. Thermik nach Gleichung 3.9 und 3.10

Ergebnis	Versuch	Simulation	Berechnung nach BSM	
			windinduziert	temperaturinduziert
Luftwechsel	[1/h]	[1/h]	[1/h]	[1/h]
Übergang	6,6	6,7	6,5	3,8 bis 5,4
Sommer	3,3 bis 3,4	3,3	3,3	6,6 bis 7,6
Winter	10 bis 11	(-)	(-)	10,4

Tabelle 7.4: Ergebnisse der Luftwechselbestimmung aus Versuch, Simulation und Berechnung

Der Ansatz, den durchschnittlichen Luftwechsel im Atrium über den windinduzierten Anteil zu bestimmen, erweist sich somit in einem weiten Bereich der möglichen Randbedingungen als sinnvoll. Dies bestätigen auch die Ergebnisse der Luftwechseluntersuchungen in der Übergangszeit und im Sommer, die unter realen Lüftungsbedingungen durchgeführt wurden. Beide Ergebnisse konnten im Rahmen der Simulation mit entsprechenden Windrandbedingungen erzielt werden. Darüber hinaus wurden sie auch durch die Berechnung des windinduzierten Luftwechsels nach BSM bestätigt (siehe Tabelle 7.4).

Die Luftwechseluntersuchung im Winter stellt einen Lüftungsfall dar, der in der Realität nicht eintritt. Das Ergebnis dieses Versuches diente dazu, die Berechnungsmethode zur Ermittlung

des temperaturinduzierten Luftwechsels zu prüfen.

Der durchschnittliche windinduzierte Luftwechsel im Atrium kann nun mit Hilfe des Diagramms zur Ermittlung des windinduzierten Luftwechsels und der verfügbaren Wetterdaten (Windrichtung und -geschwindigkeit) bestimmt werden. Hierzu wurden die Wetterdaten für den Standort Berlin Tempelhof ausgewertet (Messdaten aus dem Jahr 2004; [Wetter]). Mit einer Häufigkeit von über 50 % treten in Berlin Winde aus westlichen Richtungen auf (Bild 7.16: Nordwest, West, Südwest).

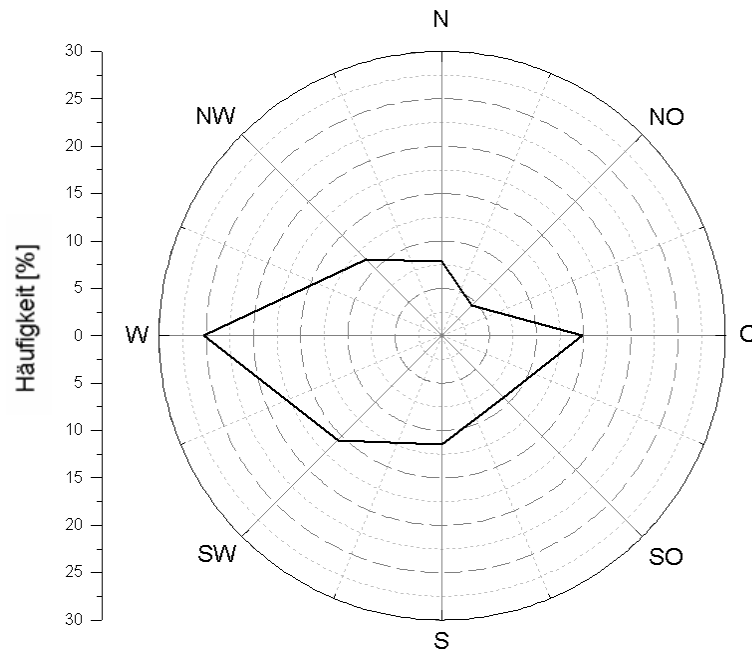


Bild 7.16: Prozentuale Häufigkeit der aufgetretenen Windrichtungen – Stundenmittelwerte

Richtung	Nord	Nordost	Ost	Südost	Süd	Südwest	West	Nordwest
Häufigkeit [%]	7,8	4,4	14,9	9,2	11,4	15,6	25,3	11,4

Tabelle 7.5: Prozentuale Häufigkeit der aufgetretenen Windrichtungen – Stundenmittelwerte

In Tabelle 7.6 ist die prozentuale Häufigkeit aufgetragen, mit der bestimmte Windgeschwindigkeiten aus den entsprechenden Windrichtungen innerhalb eines Jahres auftreten. Die gelb gekennzeichneten Zellen markieren den Wertebereich, in dem mindestens 95 % der aufgetretenen Windgeschwindigkeiten liegen. Die Windgeschwindigkeiten liegen in fast 80 % der Zeit über 2 m/s.

Tabelle 7.7 zeigt die Gesamthäufigkeit der aufgetretenen Wertepaare Windgeschwindigkeit / Windrichtung. Aus diesen Werten lässt sich mit Hilfe der Luftwechsel aus Tabelle 7.8 ein durchschnittlicher jährlicher Raumlufthauswechsel berechnen. Die Werte in Tabelle 7.8 wurden aus dem Diagramm in Abschnitt 6.3 ermittelt.

Für mittlere Windgeschwindigkeiten von 1 bis 5 m/s ergibt sich aus den vorliegenden Winddaten für das gesamte Jahr ein **durchschnittlicher Luftwechsel von 6 h<sup>-1</sup>** im Atrium des EnergieForums.

Windrichtung	Nord	Nordost	Ost	Südost	Süd	Südwest	West	Nordwest
Häufigkeit der Windgeschwindigkeit	%	%	%	%	%	%	%	%
Windgeschwindigkeit								
1 m/s	12.3	8.5	6.3	16.1	18.7	8.4	4.3	8.0
2 m/s	18.9	21.9	14.7	19.1	19.6	12.1	7.7	13.6
3 m/s	21.8	26.2	28.6	26.0	21.1	19.0	14.4	20.5
4 m/s	22.6	26.9	25.6	19.5	17.9	21.5	18.7	24.6
5 m/s	13.4	13.5	15.3	13.9	12.3	15.1	19.1	15.1
6 m/s	6.6	2.3	5.3	4.5	5.7	11.0	16.1	9.0
7 m/s	2.9	0.8	2.8	0.6	3.3	6.2	9.8	5.3
8 m/s	1.1	0.0	1.4	0.2	1.1	4.0	3.6	2.6
9 m/s	0.2	0.0	0.0	0.2	0.3	1.9	2.1	1.2
10 m/s	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2	0.9	1.3	0.2
>10 m/s	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	2.9	0.2
>95 % - Anteil	95.6	96.9	95.9	99.1	95.2	97.1	95.9	95.9

Tabelle 7.6: Prozentuale Häufigkeit einer bestimmten Windgeschwindigkeit für die Hauptwindrichtungen

Windrichtung	Nord	Nordost	Ost	Südost	Süd	Südwest	West	Nordwest
Häufigkeit der Windgeschwindigkeit	%	%	%	%	%	%	%	%
Windgeschwindigkeit [m/s]								
1	1,0	0,4	0,9	1,5	2,1	1,3	1,1	0,9
2	1,5	1,0	2,2	1,8	2,2	1,9	1,9	1,5
3	1,7	1,2	4,3	2,4	2,4	3,0	3,7	2,3
4	1,8	1,2	3,8	1,8	2,0	3,3	4,7	2,8
5	1,0	0,6	2,3	1,3	1,4	2,4	4,8	1,7
6	0,5	0,1	0,8	0,4	0,6	1,7	4,1	1,0
7	0,2	0,0	0,4	0,1	0,4	1,0	2,5	0,6
8	0,1	0,0	0,2	0,0	0,1	0,6	0,9	0,3
9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,5	0,1
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,0
>10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,0

Tabelle 7.7: Prozentuale Häufigkeit einer bestimmten Windgeschwindigkeit und –richtung

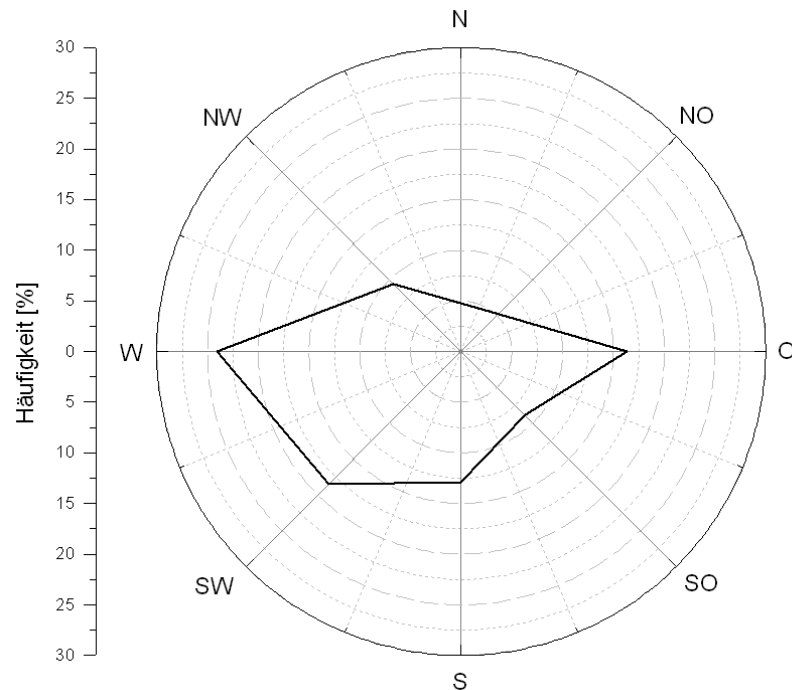
Windrichtung	Nord	Nordost	Ost	Südost	Süd	Südwest	West	Nordwest
Luftwechsel (aus Nomogramm)	1/h	1/h	1/h	1/h	1/h	1/h	1/h	1/h
Windgeschwindigkeit [m/s]								
1	1,0	1,2	1,1	1,2	3,0	2,7	3,0	1,4
2	2,3	1,7	2,5	1,7	5,8	5,2	5,8	2,0
3	3,5	2,3	3,8	2,3	8,5	7,6	8,5	2,7
4	4,8	2,8	5,3	2,8	11,5	10,2	11,5	3,3
5	6,0	3,5	6,6	3,5	14,3	12,7	14,3	4,0
>5	>6,0	>3,5	>6,6	>3,5	>14,3	>12,7	>14,3	>4,0

Tabelle 7.8: Luftwechsel für verschiedene Windrichtungen und -geschwindigkeiten, Lamellen 100 % offen



Berücksichtigt man weiterhin, dass das Atrium gem. Kapitel 4.3 erst bei Außenlufttemperaturen  $\geq 14^\circ\text{C}$  gelüftet wird, beträgt der **durchschnittliche Luftwechsel  $6,3 \text{ h}^{-1}$** .

(Wetterdatensatz reduziert auf mittlere Windgeschwindigkeiten von 1 bis 5 m/s und Außenlufttemperaturen  $\geq 14^\circ\text{C}$ ).



**Bild 7.17: Prozentuale Häufigkeit der aufgetretenen Windrichtungen – Stundenmittelwerte;  $T_a \geq 14^\circ\text{C}$**

Richtung	Nord	Nordost	Ost	Südost	Süd	Südwest	West	Nordwest
Häufigkeit [%]	4,8	5,2	16,3	8,9	12,9	18,5	24,0	9,4

**Tabelle 7.9: Prozentuale Häufigkeit der aufgetretenen Windrichtungen – Stundenmittelwerte;  $T_a \geq 14^\circ\text{C}$**

Windrichtung	Nord	Nordost	Ost	Südost	Süd	Südwest	West	Nordwest
Häufigkeit der Windgeschwindigkeit	%	%	%	%	%	%	%	%
Windgeschwindigkeit [m/s]								
1	0,9	0,4	1,1	1,3	2,0	0,8	0,8	0,7
2	1,4	1,5	2,3	2,0	2,4	1,7	1,7	1,4
3	1,5	1,4	5,3	2,6	3,0	2,8	2,6	1,8
4	0,7	1,3	4,3	1,7	2,8	3,6	4,6	2,1
5	0,3	0,5	2,0	1,3	1,8	3,6	4,8	1,4
6	0,1	0,1	0,7	0,1	0,6	2,8	4,7	0,9
7	0,0	0,0	0,4	0,0	0,2	1,7	2,7	0,6
8	0,0	0,0	0,2	0,0	0,1	1,0	0,9	0,3
9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,9	0,1
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,5	0,0
>10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0

**Tabelle 7.10: Prozentuale Häufigkeit einer bestimmten Windgeschwindigkeit und –richtung;  $T_a \geq 14^\circ\text{C}$**

## 8 Anwendung in der Praxis

Auf Basis der Ergebnisse der vorangegangenen Untersuchungen wird in diesem Kapitel die Vorgehensweise zur Ermittlung des durchschnittlichen windinduzierten Luftwechsels an einem einfachen Beispielgebäude demonstriert. Da der Luftwechsel linear mit der Windgeschwindigkeit zunimmt, wird je Windrichtung nur eine Windgeschwindigkeit simuliert. Auf diese Weise wird der Rechenaufwand erheblich reduziert.

Bei dem Beispielgebäude handelt sich um einen symmetrischen Baukörper ohne Nachbarbebauung, so dass lediglich fünf relevante Anströmrichtungen untersucht werden müssen (siehe Bild 8.1). Die Anströmrichtung  $0^\circ$  kennzeichnet die senkrechte Anströmung der Zuluftlamellen. Es wird das Windprofil aus Kapitel 6.2.2 verwendet. Entsprechend Bild 6.9 wird ein Oktaeder um das Gebäudemodell angeordnet, um die Hauptwindrichtungen abzubilden.

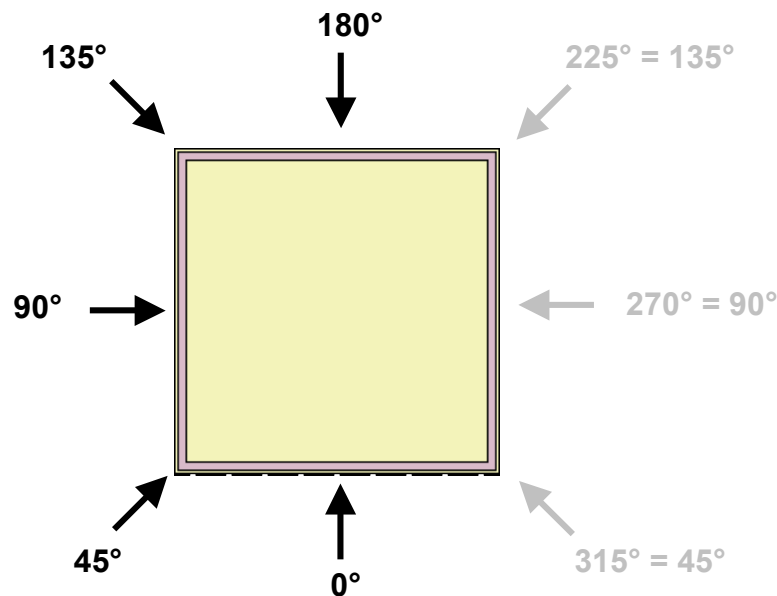


Bild 8.1: Definition der Anströmrichtungen

Aus den Simulationsergebnissen wird ein gebäudespezifisches Diagramm zur Ermittlung des windinduzierten Luftwechsels im Atrium erstellt. Die für die Durchströmung relevante Druckbeiwertdifferenz zwischen den geöffneten Zu- und Abluftflächen wird aus den Simulationsergebnissen bestimmt. Mit diesem Wert kann der Luftwechsel für weitere Windgeschwindigkeiten mit Hilfe der British Standard Method ermittelt werden. Darüber hinaus werden der Luftaustauschwirkungsgrad und der Luftaustauschindex für die untersuchten Anströmrichtungen berechnet.

Im Anschluss wird das aus den fünf Simulationsvarianten erstellte Diagramm durch beliebig gewählte Lüftungssituationen im Rahmen weiterer Simulationsrechnungen überprüft. Den Simulationsergebnissen werden die Berechnungsergebnisse nach British Standard Method gegenübergestellt.

## 8.1 Gebäudemodell

In dem würfelförmigen Baukörper befindet sich ein innenliegendes Atrium, das im Dachbereich überhöht ist. Im Erdgeschoss erstreckt sich das Atrium über die gesamte Grundfläche (siehe Bild 8.2). Die Zuluft strömt über Öffnungen in der Erdgeschossfassade in das Atrium.

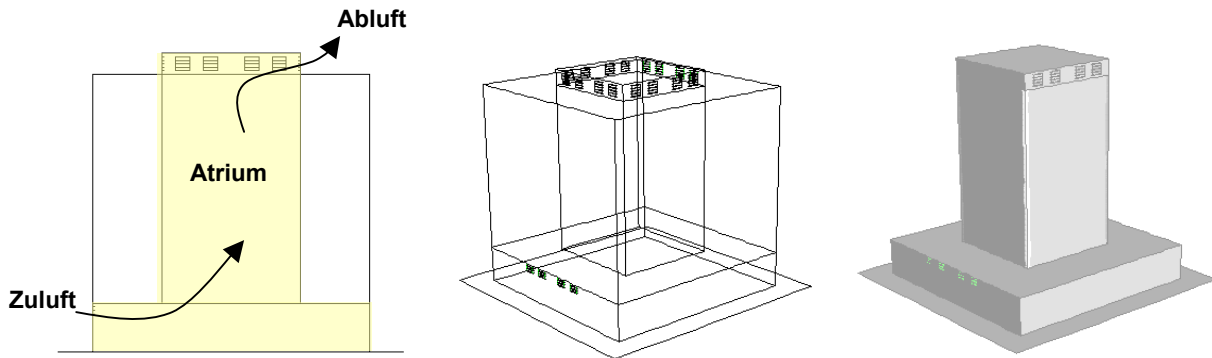


Bild 8.2: v. links n. rechts: Schnitt durch das Gebäude; Ansicht; Atriumvolumen

Die Abmessungen des untersuchten Gebäudes betragen:

### Kubus:

Länge = Breite = Höhe = 20 m;

### Atrium:

Länge = Breite = 10 m, Höhe des Atriums = 21,5 m; EG: Länge = Breite = 20 m

Erdgeschoßhöhe = 3,50 m

### Zu/Abluftöffnungen:

- 4 Zuluftöffnungen in der Erdgeschossfassade mit je  $1,0 \text{ m} \cdot 0,75 \text{ m} = 3 \text{ m}^2$  (Zuluftfläche gesamt = Bruttoquerschnitt = 100 %);  
Lamellenkonstruktion: die geöffneten Lamellen sind um  $90^\circ$  geneigt.
- Abluftfläche je Seite des überhöhten Atriums:  $4 \cdot 1,0 \text{ m} \cdot 1,0 \text{ m} = 4 \text{ m}^2$  je Seite;  
es werden jeweils 4 Flächen mit insgesamt  $4 \text{ m}^2$  geöffnet (Bruttoquerschnitt = 100 %)  
Lamellenkonstruktion: die geöffneten Lamellen sind um  $90^\circ$  geneigt.

Die seitlich angeordneten Dachklappen werden windrichtungsabhängig leeseitig geöffnet. Die bei verschiedenen Anströmrichtungen geöffneten Flächen sind in Bild 8.3 und 8.4 farbig gekennzeichnet.

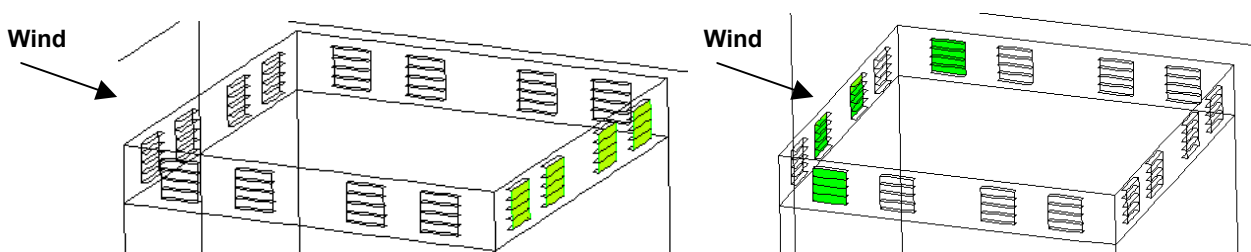


Bild 8.3: Darstellung der geöffneten Abluftflächen; links: Anströmrichtung  $0^\circ$  und  $180^\circ$ , rechts:  $90^\circ$

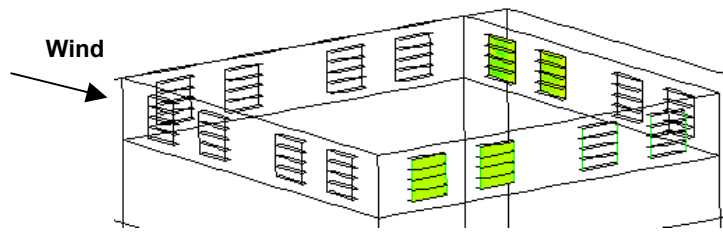


Bild 8.4: Darstellung der geöffneten Abluftflächen; Anströmrichtung 45° und 135°

## 8.2 Simulationsergebnisse

Die Ergebnisse der Simulationen, die mit einer Windgeschwindigkeit von 5 m/s berechnet wurden, sind in Tabelle 8.1 zusammenfassend dargestellt. Aus ihnen wurde das Diagramm zur Ermittlung des Luftwechsels in Bild 8.5 erstellt. Aufgrund der Symmetrie des Baukörpers wiederholen sich die Ergebnisse der Berechnungen für bestimmte Anströmrichtungen.

Anströmrichtung [°]	Luftwechsel [h <sup>-1</sup> ]	Druckbeiwertdifferenz [-]	Mittleres Luftalter [s]	Luftaustauschzeit [s]	Luftaustausch- wirkungsgrad [-]
0	11,38	1,975	341	682	0,46
45	12,22	2,275	250	500	0,59
90	2,25	0,077	1253	2506	0,64
135	5,93	0,536	478	956	0,64
180	6,08	0,564	515	1030	0,57

Tabelle 8.1: Ergebnisse aus der Simulation; Windgeschwindigkeit 5 m/s

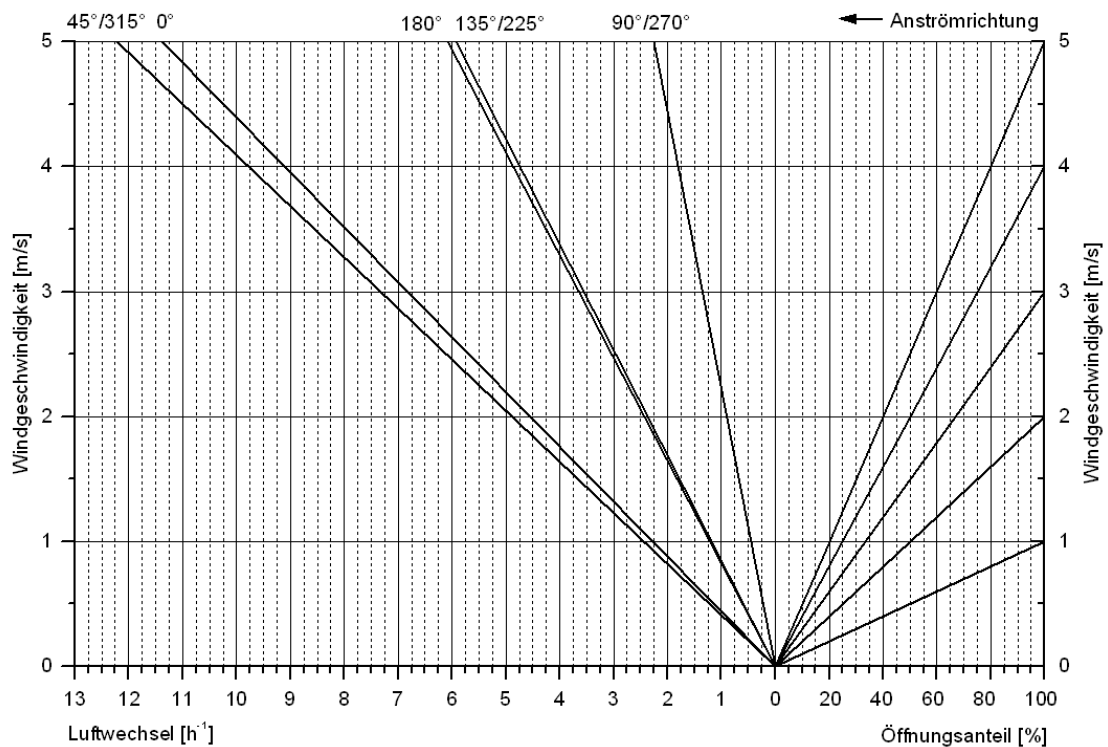


Bild 8.5: Diagramm zur Ermittlung des Luftwechsels als Funktion der Windrichtung, der Windgeschwindigkeit und der geöffneten Fensterfläche

Die nachfolgenden Bilder 8.6 Bis 8.10 zeigen jeweils die Verteilung des lokalen Luftalters und des Luftaustauschindex in der Schnittebene Atriummitte für die untersuchten Anströmrichtungen (Windgeschwindigkeit 5 m/s). Mit Hilfe der Luftaustauschindexe und des Luftaustauschwirkungsgrades aus Tabelle 8.1 kann das lokale Luftalter für andere Luftwechsel in den dargestellten Schnittebenen nach Formel 6.4 berechnet werden.

**Beispiel:** Anströmrichtung 0° (Bild 8.6): Der Luftaustauschindex im EG beträgt im Mittel etwa 0,5 (Bild 8.6, rechts), die Luftaustauschzeit 682 s gem. Tabelle 8.1. Das ergibt rechnerisch ein lokales Luftalter von  $0,5 \cdot 682 \text{ s} = 341 \text{ s} \rightarrow$  vergleiche lokales Luftalter EG (Bild 8.6, links). Bei einer Luftaustauschzeit von beispielsweise 3600 s erhöht sich das lokale Luftalter im EG auf 1800 s.

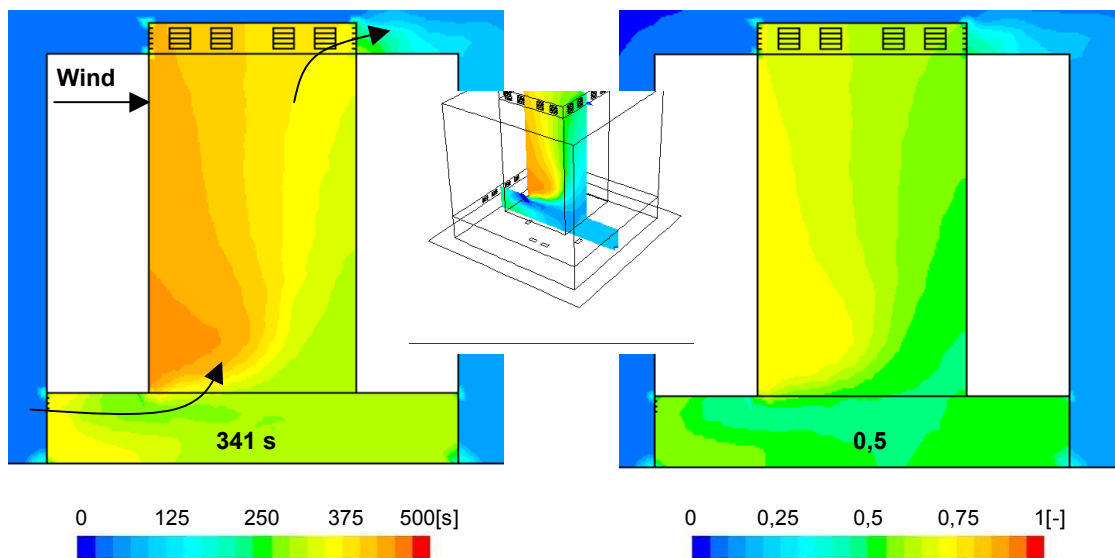


Bild 8.6: Verteilung des lokalen Luftalters (links) und des Luftaustauschindexes (rechts); Windgeschwindigkeit 5 m/s; Anströmrichtung 0°; Öffnungsanteil 100 %

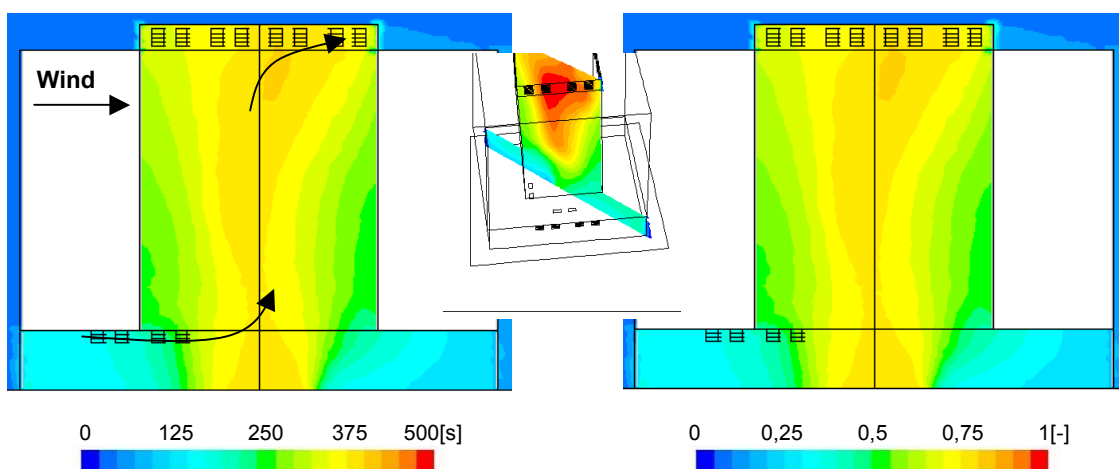
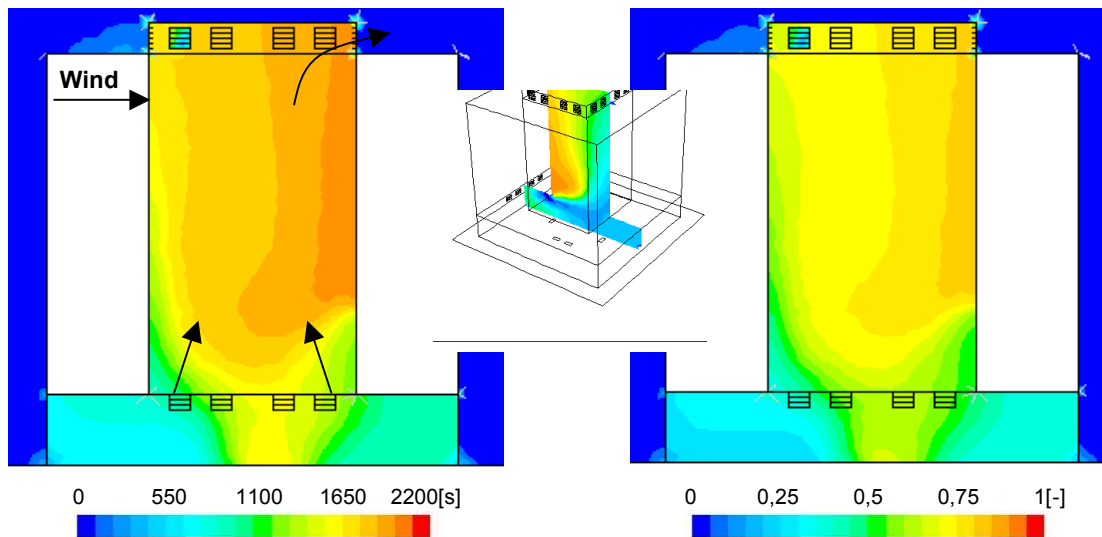
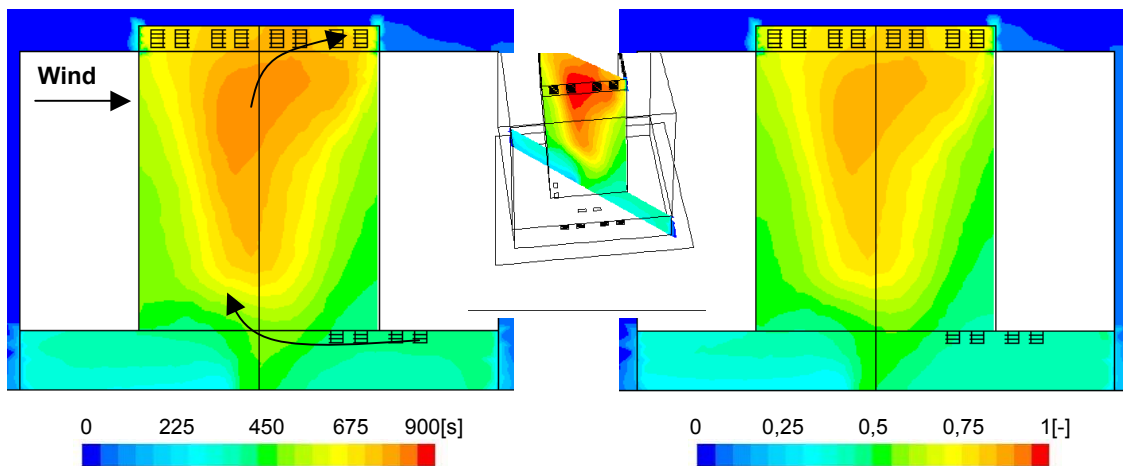


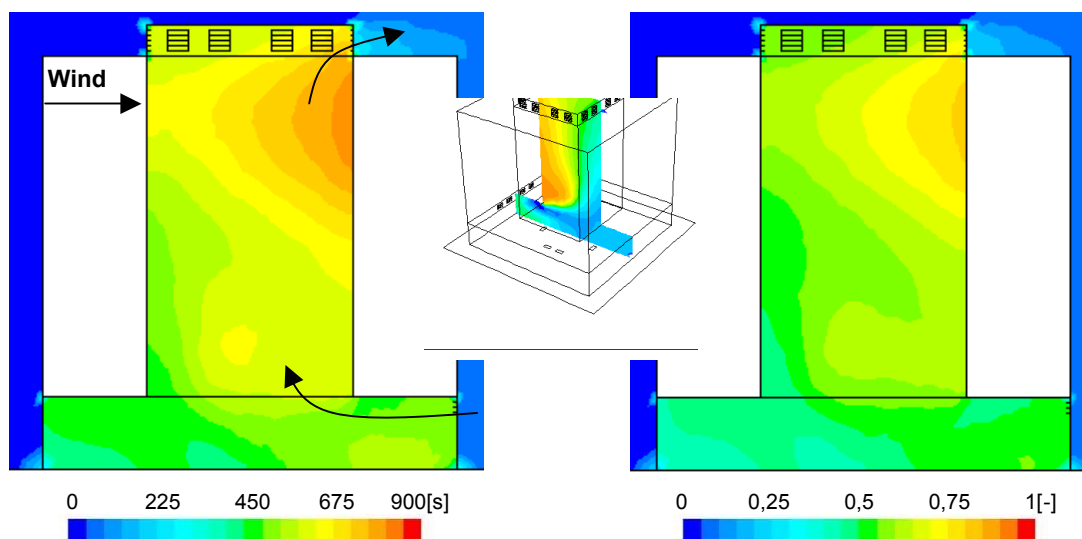
Bild 8.7: Verteilung des lokalen Luftalters (links) und des Luftaustauschindexes (rechts); Windgeschwindigkeit 5 m/s; Anströmrichtung 45°; Öffnungsanteil 100 %



**Bild 8.8:** Verteilung des lokalen Luftalters (links) und des Luftaustauschindex (rechts);  
Windgeschwindigkeit 5 m/s; Anströmrichtung 90°; Öffnungsanteil 100 %



**Bild 8.9:** Verteilung des lokalen Luftalters (links) und des Luftaustauschindex (rechts);  
Windgeschwindigkeit 5 m/s; Anströmrichtung 135°; Öffnungsanteil 100 %



**Bild 8.10:** Verteilung des lokalen Luftalters (links) und des Luftaustauschindex (rechts);  
Windgeschwindigkeit 5 m/s; Anströmrichtung 180°; Öffnungsanteil 100 %

### 8.3 Durchschnittlicher, windinduzierter Luftwechsel

Beispielhaft ergeben sich aus dem Diagramm (Bild 8.5) bei einer Süd-Orientierung des Gebäudes die in Tabelle 8.2 dargestellten Luftwechsel (Beispiel: Süd = 0° = Zuluftfassade):

Windrichtung	Nord (180°)	Nordost (225°)	Ost (270°)	Südost (315°)	Süd (0°)	Südwest (45°)	West (90°)	Nordwest (135°)
Luftwechsel (aus Nomogramm)	1/h	1/h	1/h	1/h	1/h	1/h	1/h	1/h
Windgeschwindigkeit [m/s]								
1	1,2	1,2	0,4	2,4	2,2	2,4	0,4	1,2
2	2,3	2,3	0,8	4,8	4,5	4,8	0,8	2,3
3	3,6	3,5	1,3	7,3	6,8	7,3	1,3	3,5
4	4,8	4,7	1,8	9,8	9,2	9,8	1,8	4,7
5	6,1	5,9	2,3	12,2	11,4	12,2	2,3	5,9
>5	>6,1	>5,9	>2,3	>12,2	>11,4	>12,2	>2,3	>5,9

Tabelle 8.2: Luftwechsel für verschiedene Windrichtungen und -geschwindigkeiten aus Diagramm 8.10

Bei gleicher Verteilung der Windgeschwindigkeiten und -richtungen wie in Tabelle 7.4 ergeben die Werte aus Tabelle 8.2 einen **durchschnittlichen, windinduzierten Raumlufwechsel von  $4,5 \text{ h}^{-1}$**  für Windgeschwindigkeiten von 1 bis 5 m/s.

### 8.4 Prüfung des Diagramms

Um das Diagramm zu überprüfen, wird nachträglich eine willkürlich gewählte Lüftungssituation simuliert. Hierbei wird die Abluftfläche nur zu 50 % geöffnet, die Zuluftfläche weiterhin zu 100 %, d.h. der Gesamtöffnungsanteil zur Bestimmung des Luftwechsels aus dem Diagramm beträgt 75 %. Der Luftwechsel wird für eine Windgeschwindigkeit von 4 m/s bei einer Anströmung aus 180° berechnet. Als Ergebnis aus dem Diagramm wird ein 3,55-facher Raumlufwechsel erwartet.

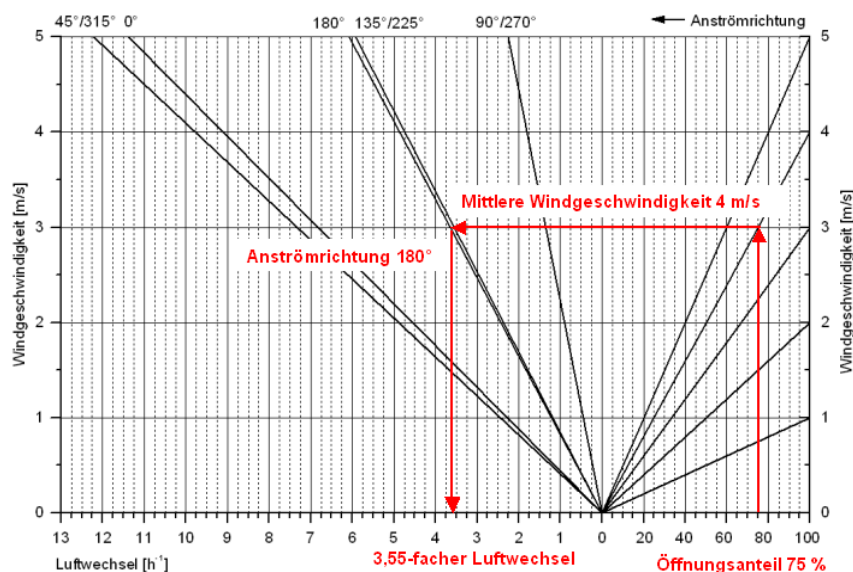


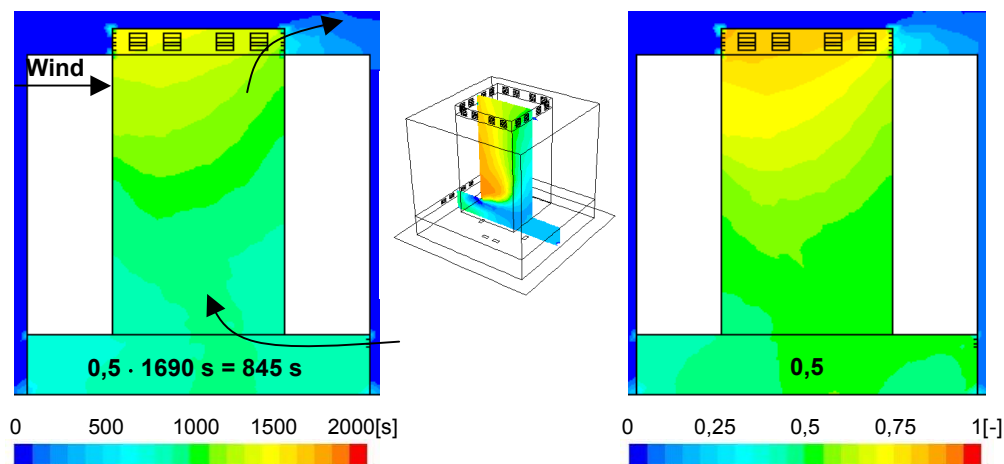
Bild 8.11: Diagramm zur Ermittlung des Luftwechsels als Funktion der Windrichtung, der Windgeschwindigkeit und der geöffneten Fensterfläche

Die Simulation ergab einen 3,4-fachen Luftwechsel. Auch bei unterschiedlichen Öffnungsflächenanteilen von Zu- und Abluftfläche liefert das Diagramm eine gute Übereinstimmung mit dem Simulationsergebnis. Die Abweichung beträgt weniger als 5 %. Dies ist für eine Abschätzung des zu erwartenden Raumlufwechsels ausreichend.

Anströmrichtung	Luftwechsel	Mittleres Luftalter	Luftaustauschzeit	Luftaustauschwirkungsgrad
[°]	[h <sup>-1</sup> ]	[s]	[s]	[-]
180	3,4	845	1690	0,63

**Tabelle 8.3: Ergebnis aus der Simulation; Windgeschwindigkeit 4 m/s; Öffnungsanteil 75 %**

Die Berechnung nach Gleichung 3.7 der British Standard Method ergibt bei veränderten Lüftungsflächenanteilen ebenfalls einen 3,4-fachen Luftwechsel und stimmt damit sehr gut mit dem Simulationsergebnis überein. Hier werden die veränderten Flächenteile genauer berücksichtigt. Die Druckbeiwertdifferenz, die im Rahmen der vorangegangenen Simulationen bestimmt wurde, führt auch bei der veränderten Windgeschwindigkeit in der Berechnung zu dem gleichen Ergebnis wie die Simulation (Druckbeiwertdifferenz = 0,564 gem. Tabelle 8.1). Bild 8.12 zeigt die Verteilung des lokalen Luftalters und des Luftaustauschindex in der Schnittebene Atriummitte für die untersuchte Variante.



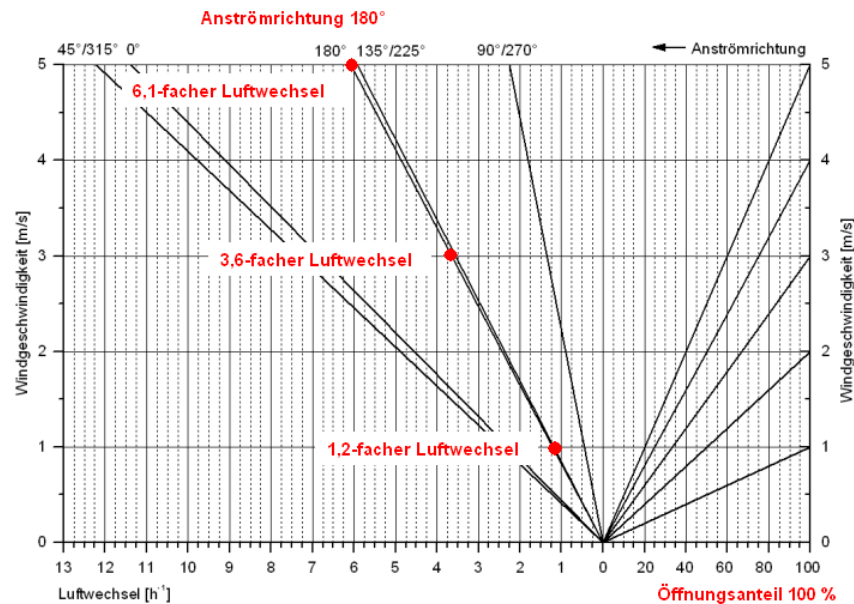
**Bild 8.12: Verteilung des lokalen Luftalters (links) und des Luftaustauschindex (rechts); Windgeschwindigkeit 4 m/s; Anströmrichtung 180°; Öffnungsanteil 75 %**

Nachfolgend werden für weitere willkürlich gewählte Varianten der Luftaustauschwirkungsgrad und der Luftaustauschindex bei gleicher Anströmrichtung, gleichem Öffnungsanteil und unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten gegenübergestellt. Vorab werden die Luftwechsel aus dem Diagramm ermittelt, um sie mit den Ergebnissen der Simulation zu vergleichen.

Untersucht wird die Anströmrichtung 180° mit Windgeschwindigkeiten von 1 m/s, 3 m/s und 5 m/s (→ Tabelle 8.1).



Bei einer Windgeschwindigkeit von 3 m/s beträgt der Luftwechsel gem. Diagramm 3,6 h<sup>-1</sup>, in der Simulation wird ein 3,7-facher Luftwechsel berechnet. Bei einer Windgeschwindigkeit von 1 m/s liegt der simulierte Luftwechsel mit 1,3 h<sup>-1</sup> ebenfalls knapp über dem Erwartungswert von 1,2 h<sup>-1</sup> aus dem Diagramm. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8.4 zusammenfassend dargestellt. Bild 8.13 zeigt die entsprechenden Luftwechsel im Diagramm.



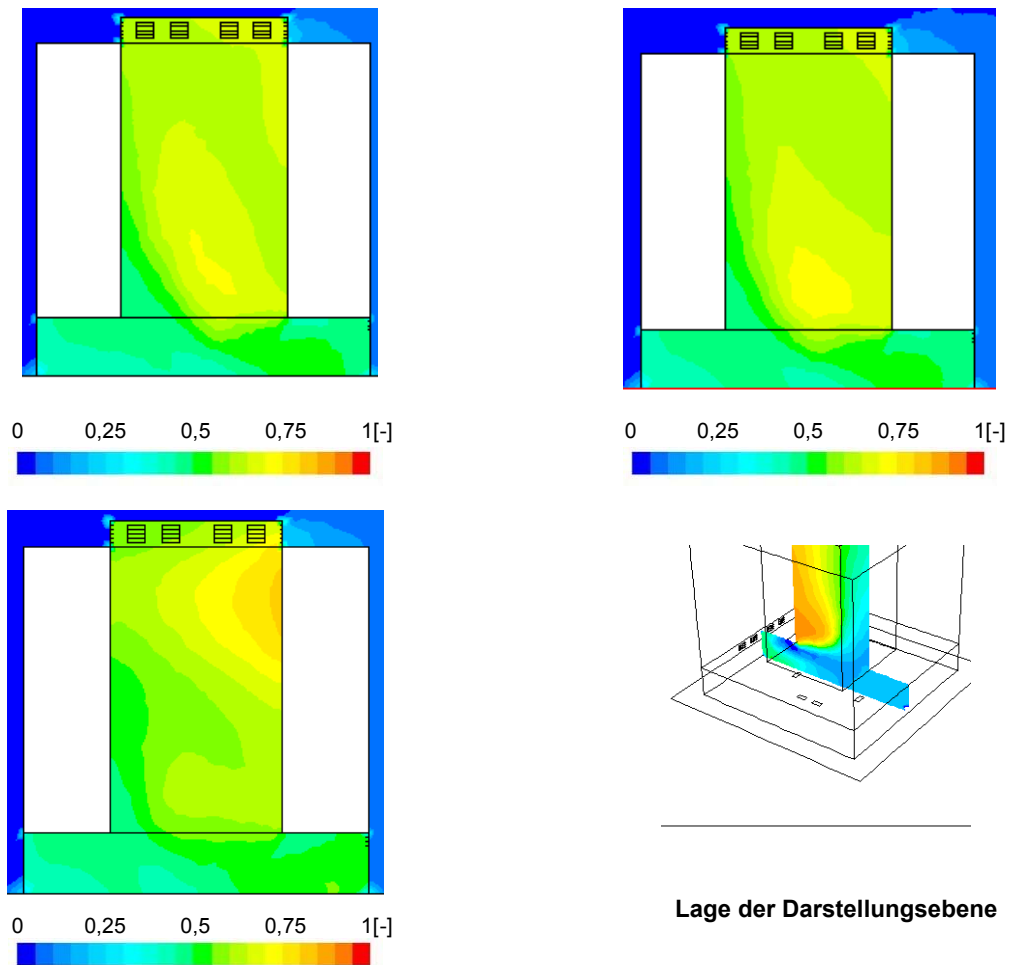
**Bild 8.13:** Diagramm zur Ermittlung des Luftwechsels als Funktion der Windrichtung, der Windgeschwindigkeit und der geöffneten Fensterfläche

Windgeschwindigkeit [m/s]	Luftwechsel Simulation/Diagramm [h <sup>-1</sup> ]	Mittleres Luftalter [s]	Luftaustauschzeit [s]	Luftaustauschwirkungsgrad [-]
1	1,3 / 1,2	2464	4928	0,56
3	3,7/ 3,6	879	1758	0,55
5	6,1/ 6,1	515	1030	0,57

**Tabelle 8.4:** Simulationsergebnisse; Windgeschwindigkeit 1 bis 5 m/s; Anströmrichtung 180°; Öffnungsanteil 100%

In der Parameterstudie zur Ermittlung des Raumlufwechsels im Atrium des EnergieForums wurde ein Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeit, Öffnungsanteil und Luftaustauschwirkungsgrad bzw. -index festgestellt. Der Luftaustauschwirkungsgrad blieb bei gleichem Öffnungsanteil und zunehmender Windgeschwindigkeit konstant.

Dies gilt in gleicher Weise für die stichprobenartig gewählten Varianten der Anströmrichtung 180°. Der Luftaustauschwirkungsgrad von 0,56 schwankt um  $\pm 1,8 \%$  bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten (siehe Tabelle 8.4). Auch die Verteilung der Luftaustauschindices zeigt einen ähnlichen Verlauf bei den drei simulierten Varianten. Bild 8.14 zeigt die Verteilung der Luftaustauschindices bei Windgeschwindigkeiten von 1 m/s, 3 m/s und 5 m/s (Schnitt in Atriummitte).



**Bild 8.14:** Verteilung der Luftaustauschindizes; oben links: Windgeschwindigkeit 1 m/s; oben rechts: Windgeschwindigkeit 3 m/s; unten links: Windgeschwindigkeit 5 m/s Anströmrichtung 180°; Öffnungsanteil 100 %

Um das Diagramm zur Ermittlung des Luftwechsels (Bild 8.5) zu erstellen, wurden lediglich fünf Simulationsvarianten berechnet. Die Überprüfung weiterer beliebiger Luftwechsel im Rahmen von anschließenden Simulationen führte zu einer guten Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus dem Diagramm. Aus den Simulationen konnte darüber hinaus die für die Durchströmung relevante Druckbeiwertdifferenz für die untersuchten Anströmrichtungen ermittelt werden. Diese kann zur Berechnung des windinduzierten Luftwechsels nach Gleichung 3.7 der British Standard Method herangezogen werden. Auch hier führte die stichprobenartige Überprüfung zu verlässlichen Ergebnissen.

## 9 Zusammenfassung

Im Atrium des Energieforums in Berlin wurde der Luftwechsel sowohl messtechnisch als auch durch umfangreiche Simulationen untersucht und bewertet. Grundlagen der vorliegenden Arbeit sind die Windkanalstudie zur Ermittlung der Druckbeiwerte  $[K+L]$  sowie die messtechnischen Untersuchungen zur Bestimmung des Luftwechsels im Atrium unter natürlichen meteorologischen Randbedingungen im Januar, Mai und August 2005.

Als Messverfahren wird die Tracergastechnik eingesetzt, deren prinzipielle Anwendungsmöglichkeiten und Methoden vorgestellt werden. Die detaillierte Darstellung des Versuchsaufbaus umfasst die Dokumentation des Tracergasmesssystems.

Die Messdaten werden für die Anpassung des Simulationsmodells herangezogen. Die Mess- und Simulationsergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Ergebnisse der Druckverteilung aus der Windkanalstudie konnten durch eine Simulation nahezu identisch abgebildet werden. Da das Simulationsprogramm durch benutzerdefinierte Funktionen erweiterbar ist, lassen sich alle erforderlichen Windprofile abbilden. Der Vorteil der Simulation liegt darin, dass die Verteilung der Druckbeiwerte auf der gesamten Gebäudehülle abgebildet wird und nicht, wie bei einer Windkanalstudie, einzelne Messpunkte erfasst werden, die im Vorfeld ohne Kenntnis der genauen Druckverteilung bestimmt werden müssen. Die Untersuchung der Druckverteilung auf der geschlossenen Gebäudehülle ist zur Bestimmung der angreifenden Windbelastung notwendig. Wird diese in einem frühen Planungsstadium durchgeführt, kann mit Hilfe dieser Ergebnisse auch die Lage von Zu- und Abluftöffnungen optimiert werden, nicht aber deren Wirkungsweise. Die Ermittlung des windinduzierten Innenraumluftwechsels erfordert eine weitergehende Betrachtung.
- Der thermisch induzierte und der windinduzierte Luftwechsel nehmen bei gleichzeitiger Einwirkung in der voneinander unabhängigen Berechnung nach der British Standard Method häufig vergleichbare Werte an. Es ist somit nicht immer eindeutig festzustellen, auf welchen Effekt der Luftwechsel tatsächlich zurückzuführen ist. Es liegen Bereiche vor, in denen der reine Temperatureinfluss überwiegt und Bereiche, in denen der Luftwechsel maßgeblich durch den Wind hervorgerufen wird. Die durchgeführten Untersuchungen haben aber gezeigt, dass die Effekte sich nicht additiv überlagern und der Ansatz des windinduzierten Luftwechsels zu insgesamt realistischen Ergebnissen führt. Statistische Winddaten sind für die meisten Standorte in Deutschland verfügbar. Diese bilden somit eine gute Datengrundlage zur Bestimmung von geeigneten Randbedingungen im Planungsstadium. Mit Hilfe des Diagramms zur Ermittlung des Luftwechsels kann bei Kenntnis der für einen bestimmten Gebäudestandort im Jahresdurchschnitt auftretenden Häufigkeiten von

---

Windrichtung und Windgeschwindigkeit der durchschnittliche windinduzierte natürliche Luftwechsel in einem Atrium ermittelt und ggf. optimiert werden.

- Das Berechnungsverfahren zur Ermittlung des Luftwechsels nach der British Standard Method (BSM) liefert bei Verwendung der korrekten Druck- bzw. Temperaturdifferenz auch bei einem großem Raumvolumen sehr gute Ergebnisse. Die Bestimmung der maßgeblichen Druckdifferenz sollte mit großer Sorgfalt erfolgen. Druckbeiwerte, die an geschlossenen Fassaden ermittelt wurden, führen unter Umständen dazu, dass die Luftwechsel zu hoch eingeschätzt werden, insbesondere wenn sowohl die Zu- wie auch die Abluftöffnung durch den Winddruck/-sog beeinflusst werden. Die in der Berechnung nach BSM verwendete Druckdifferenz, die an den geöffneten Fassaden bestimmt wurde, lieferte in allen Fällen eine gute Übereinstimmung zwischen Berechnung nach British Standard Method, Simulation und Luftwechseluntersuchung.
- Um das Raumklima in einem großen Raum wie einem Atrium zu beurteilen ist allein die Angabe des Luftwechsels nicht ausreichend. Darüber hinaus sollte auf jeden Fall der Luftaustauschwirkungsgrad ermittelt werden, um die Strömungsform des Gesamtlufthaushalts zu bewerten. Zu einer genaueren Analyse der Raumlufthaltqualität sind weitere Kenngrößen erforderlich. So eignet sich beispielsweise der Luftaustauschindex zur Beschreibung der zu erwartenden Luftalterverteilung im Atrium. Er wird maßgeblich von der Lage und Art der Zu- und Abluftöffnungen sowie von der Windrichtung beeinflusst, ist aber weitgehend unabhängig von der Windgeschwindigkeit. Bei Kenntnis des Luftaustauschindex und dem dazugehörigen Luftaustauschwirkungsgrad kann das lokale Luftalter an jedem beliebigen Punkt im Raum für jeden Luftwechsel bestimmt werden.

Die Übertragbarkeit der Ergebnisse ist begrenzt auf Gebäude, die in geometrischer Form und Lage den Bedingungen der untersuchten Gebäude in etwa entsprechen.

Die Kenntnis der wirksamen Druckdifferenz zwischen geöffneter Zu- und Abluftfläche ermöglicht eine gute Abschätzung des zu erwartenden Raumlufwechsels für verschiedene Windrichtungen und -geschwindigkeiten. Wird diese im Rahmen einer Simulation bestimmt, kann darüber hinaus die Qualität der Raumluftströmung mit Hilfe der Verteilung der lokalen Luftaustauschindizes bewertet werden. Neben einer Beurteilung der Behaglichkeit im Raum, können diese Ergebnisse auch für weiterführende Planungen, wie beispielsweise die Auslegung natürlicher Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (RWA), herangezogen werden. Die einwandfreie Funktion einer natürlich wirkenden RWA setzt voraus, dass der durch die vorgesehenen Öffnungen entweichende Rauch durch frische Luft ersetzt wird. Die

Außenluftzuführung ist dabei so anzuordnen, dass der Raum in ausreichendem Maße von der zugeführten Luft durchströmt wird und eine Querlüftung erreicht wird, ohne dass dabei Kurzschlussströmungen auftreten [Quenzel]. Um die Strömung im Raum zu beurteilen, kann die Verteilung der Luftaustauschindices im Planungsstadium unterstützend hinzugezogen werden.

Der Luftaustauschwirkungsgrad und der Luftaustauschindex hängen im Wesentlichen vom vorhandenen Öffnungsflächenanteil und der Windrichtung ab, sind aber weitgehend unabhängig von der Windgeschwindigkeit. Der im Rahmen dieser Simulationsstudie festgestellte Zusammenhang sollte an weiteren geeigneten Gebäuden messtechnisch untersucht und überprüft werden. Sofern dies auch bei anderen Gebäudegeometrien nachweisbar wäre, könnte der Rechenaufwand bei der Simulation erheblich reduziert werden, da es dann in der Regel ausreichen würde, den lokalen Luftaustauschindex für eine Windgeschwindigkeit je Windrichtung zu berechnen. Mit diesem Wert kann das lokale Luftalter für beliebige Luftwechsel bestimmt werden.

In der vorliegenden Arbeit wird nicht weiter auf diesen Aspekt eingegangen, da das EnergieForum für derartige Untersuchungen nicht geeignet ist. Im Atrium können die Lamellenfelder der Zu- und Abluftöffnungen nur zu 100 % geöffnet oder geschlossen werden. Aus diesem Grund konnten keine Luftwechseluntersuchungen mit unterschiedlichen Öffnungsflächenanteilen durchgeführt werden.

In der Regel wird bei Neubauvorhaben keine Windkanalstudie zur Ermittlung der Druckbeiwerte durchgeführt. Auch entsprechende Strömungssimulationen werden nur in Ausnahmefällen beauftragt. Wird die Druckverteilung dennoch benötigt, z.B. zur Berechnung des Innenraumluftwechsels, muss man auf andere Methoden zur Bestimmung der Druckbeiwerte zurückgreifen.

Für einfache Gebäudegeometrien liefert die aktuelle Neufassung der DIN 1055-4 [DIN 1055] eine genauere Verteilung der Druckbeiwerte als die vorangegangene Fassung aus dem Jahr 1986. Bild D1 in Anhang D zeigt beispielhaft die Einteilung von Wand- und Dachflächen bei Flachdächern und die dazugehörigen Druckbeiwerte an einem einfachen würfelförmigen Gebäude. Einzelheiten zu den entsprechenden Flächenabmessungen sind der DIN zu entnehmen.

Vergleicht man diese Werte jedoch mit der tatsächlichen Verteilung der Druckbeiwerte am würfelförmigen Gebäude aus Kapitel 6.2.1 wird schnell deutlich, dass die Werte der DIN nicht den Anspruch haben, den Verlauf der Druckbeiwerte möglichst realistisch abzubilden. Hier geht es vielmehr darum, die maximale Windbelastung auf einer Fläche zu bestimmen.

Zur Berechnung des Innenraumluftwechsels ist die Kenntnis der genauen Verteilung der Druckbeiwerte notwendig. Der Ansatz der Druckbeiwerte aus der DIN führt, je nach Lage der Zu- und Abluftöffnungen, unter Umständen zu deutlich erhöhten Druckbeiwertdifferenzen und damit zu erhöhten Luftwechseln.

---

Für Lüftungsberechnungen sollte auf andere Quellen bzw. Methoden zur Bestimmung der maßgeblichen Druckbeiwertdifferenz zurückgegriffen werden. Eine Zusammenstellung der Widerstandsbeiwerte praxisüblicher Öffnungen mit und ohne Einbauten findet sich beispielsweise in [Quenzel].

Bei hohen Anforderungen an die Raumlufthausqualität sind detaillierte Untersuchungen im Windkanal oder mit Hilfe der Strömungssimulation ratsam, um gebäudespezifische Besonderheiten bei der Planung der natürlichen Lüftung korrekt zu erfassen.

**Fazit:**

Da jedes Gebäude in seiner Art und Lage einzigartig ist, sind allgemeingültige Aussagen hinsichtlich des zu erwartenden Innenraumlufthauswechsels mit großen Unsicherheiten behaftet.

Der Bestimmung der maßgeblichen gebäudespezifischen Druckdifferenz kommt somit auch künftig eine besondere Bedeutung zu, insbesondere bei der Betrachtung von Innenraumströmungen. Hier hat sich die Strömungssimulation als geeignetes Planungshilfsmittel erwiesen. Um den Rechenaufwand insgesamt zu reduzieren, ist eine Kombination aus Simulation und Rechenverfahren nach British Standard Method anzustreben. Die Ergebnisse lassen sich anschaulich in einem gebäudespezifischen Diagramm zur Ermittlung des windinduzierten Luftwechsels zusammenfassen.

Das Verfahren eignet sich zur Ermittlung des durchschnittlichen Luftwechsels, wenn die Temperaturdifferenz zwischen Raumlufthaus und Außenluft gering ist (bis ca. 4 K) und somit der windinduzierte Luftwechsel überwiegt. Bei Atrien, die wie im Beispielgebäude in der Übergangszeit und in den Sommermonaten nahezu durchgehend gelüftet werden, ist dies in der Regel gegeben. Dies hat die Auswertung der Temperaturen im EnergieForum Berlin aus dem Jahr 2004 ergeben.

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Dissertation selbständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt habe und andere als die in der Dissertation angegebenen Hilfsmittel nicht benutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder unveröffentlichten Schriften entnommen sind, habe ich als solche kenntlich gemacht.

Kein Teil dieser Arbeit ist in einem anderen Promotions- oder Habilitationsverfahren verwendet worden.

Mülheim, Mai 2006

Frauke Gerder

## Literaturverzeichnis

- [Allard] Allard, F.: Natural Ventilation in Buildings. A design handbook. James & James (Science Publishers Ltd.), England 1998
- [Badde] Badde, O.; Plate, E.J.: Einfluss verschiedener Bebauungsmuster auf die Parameter der Grenzschicht und die windinduzierte Gebäudebelastung. Abschlusskolloquium SFB 210, Universität Karlsruhe, 1994
- [Bohl] Bohl, W.: Technische Strömungslehre. Vogel Buchverlag, 9. Auflage 1991
- [Castro] Castro, I.P.; Robins, A.G.: The flow around a surface-mounted cube in uniform and turbulent streams. Journal of Fluid Mechanics, Vol. 79, Part 2, 307-335, 1977
- [ClimaSuisse] Bundesamt für Energiewirtschaft Bern: Lüftung von großen Räumen - Handbuch für Planer. Clima-Suisse, Zürich 1997
- [Cook] Cook, M.J.; Lomas, K.J.: Guidance on the use of computational fluid dynamics for modelling buoyancy driver flows. Proceedings of "Building Simulation '97"/IBSPA, Vol. III, 1997
- [Dantec] Dantec Dynamics GmbH: Produktinformation zu Vivo TriGas und Vivo Dosing; Erlangen 2003
- [Davenport] Davenport: The application of statistical concepts to the wind loading of structures. Proc. Inst. of civil engineering, vol. 19, S. 449-472, 1961
- [Eisenmann] Eisenmann, G.: Thermische Simulation eines Atriums. HLH Bd. 51 (2000) Nr. 8, S. 58-60
- [Etheridge] Etheridge, D.; Sandberg, M.: Building Ventilation – Theory and Measurement. John Wiley & Sons, Chichester, England 1996
- [Fitzner] Fitzner, K.: Bewertung des Luft- und Stoffaustausches in belüfteten Räumen. Vortrag DKV-Tagung Hannover 1990; KI Klima-Kälte-Heizung 12/1990
- [Fluent] Fluent.Inc. User's Guide for Fluent, Release 6.2 (2003)
- [Gerder] Gerder, F.; Simulation des Druckabfalls über einer Blende mit FLUENT. Projektarbeit, Fachgebiet Bauphysik, Universität Gesamthochschule Kassel, 2000
- [GfA 1] Gesellschaft für Aerophysik mbH; Natürliche Lüftung. www.gfa.de, München, August 1998
- [GfA 2] Gesellschaft für Aerophysik mbH; Grenzschichtwindkanal. www.gfa.de, München, August 1998
- [GfA 3] Gesellschaft für Aerophysik mbH; Erläuterungen zum Thema Windlasten. www.gfa.de, München, August 2002
- [Hall] Hall, M.: Untersuchungen zum thermisch induzierten Luftwechselfpotential von Kippfenstern. Dissertation, Universität Gesamthochschule Kassel, Fachbereich Architektur, 2004



- 
- [Haupt] Haupt, Dr. W.: Zur Simulation von auftriebsinduzierten Innenraumströmungen. Dissertation, Universität Gesamthochschule Kassel, Fachbereich Architektur, 2001
- [Heidt] Heidt, F.-D.: Fortschritte bei der Luftwechsellmessung durch Mikrocomputereinsatz. HLH Bd. 38 (1987) Nr. 8, S. 391-395
- [Heiselberg] Heiselberg, P.; Murakami, S.; Roulet, C.-A.: Ventilation of Large Spaces in Buildings. Analysis and Prediction Techniques. IEA, Annex 26, Aalborg University, Denmark, 1998
- [Hensen] Hensen, J.: On the thermal interaction of building structure and heating and ventilating system. Dissertation, Technische Universität Eindhoven, NL, 1991
- [Himmler] Himmler, R.; Fisch, M.N.; Gerder, F.: EnergieForum Berlin, Dokumentation Energiekonzept. TU Braunschweig, Institut für Gebäude- und Solartechnik, 2004
- [Kiefer] Kiefer, H.: Windlasten an quaderförmigen Gebäuden in bebauten Gebieten. Dissertation, Universität Karlsruhe, Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen, 2003
- [Kraft] Kraft, A.; Meyer, M.: Simulationsgestützte Planung von Atrien. HLH Bd. 55 (2004) Nr. 11, S. 22-29
- [Kraus] Kraus; Die Energieumsätze in der bodennahen Atmosphäre. Ber. DWD Band 16 (1970) Nr. 171
- [K+L] Lehnhäuser, F.; Krätschmer; Windkanalstudie zur Ermittlung der durch Wind verursachten Druckbeiwerte, Kessler + Luch GmbH, Gießen, 24.05.2000
- [Lampe] Lampe, D.: Strömungstechnische Untersuchungen für das Bauvorhaben « Neue Messe Leipzig ». Diplomarbeit, FH Aachen, Fachbereich Luft- und Raumfahrttechnik, 1993
- [Lemaire] Lemaire, A.D. (Hrsg.): Room air and contaminant flow, evaluation of computational methods. TNO Building and Construction Research, Delft, 1993
- [Linden] Linden, P.F.; Lane-Serff, G.F.; Smeed, D.A.: Emptying Filling Boxes: The Fluid Mechanics of Natural Ventilation. J. Fluid Mechanics 212, 1990
- [Lobeck] Lobeck, W.; Masuhr, B.: Praktische Luftwechselermittlung. HLH Bd. 41 (1990) Nr. 12, S. 968-974 und S. 1051-1056
- [Maas] Maas, Dr. A.: Experimentelle Quantifizierung des Luftwechsels bei Fensterlüftung. Dissertation, Universität Gesamthochschule Kassel, Fachbereich Architektur, 1995
- [Moser] Moser, A.; Dorer, V.: Grundlagen der Raumluftrömung, Forschungsprogramm Energierrelevante Luftströmungen in Gebäuden, Verband Schweizerischer Heizungs- und Lüftungsfirmer (VSHL), 1. Auflage 1994
- [Niewianda] Niewianda, A.: Entwicklung der Klimakonzepte für das Kunstmuseum Stuttgart. Bauphysik 25, Heft 2, Seite 134-138, 2005

- 
- [Pernpeitner] Pernpeitner, A.: Windlasten an prismatischen Gebäuden – Ergebnisse aus einem Feldversuch. Windlasten auf Bauwerke, Berichtsheft zum Kolloquium des Sonderforschungsbereichs 210 am 7. Oktober 1988, Universität Karlsruhe, 1989
- [Quenzel] Quenzel, K.-H.: Rauch- und Wärmeabzugsanlagen im Rahmen des vorbeugenden Brandschutzes. Office 213 Verlag, Berlin, 2. Auflage, 1996
- [Recknagel] Recknagel, H.; Sprenger, E.; Schramek, E.-R.: Taschenbuch für Heizung + Klima Technik, Ausgabe 03/2004, Oldenbourg Industrieverlag München
- [Reinhold] Reinhold, T.: Strömungssimulationen, Luftalteruntersuchung in Abhängigkeit von Windrichtung und Windgeschwindigkeit. Studienarbeit, TU Braunschweig, Institut für Gebäude- und Solartechnik, 2005
- [Roulet] Roulet, C.-A.; Vandaale, L. (Hrsg): Airflow Patterns within Buildings – Measurement Techniques. Air Infiltration and Ventilation Centre, Technical Note 34, Oscar Faber Partnership, 1991
- [Rozynski] Rozynski, M.; Gerder, F.; Fisch, M.N.: Neubau Informatikzentrum der TU Braunschweig. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben FKZ 0335006T/9; TU Braunschweig, Institut für Gebäude- und Solartechnik, 2005
- [Santamouris] Santamouris, M.; Asimakopoulos, D.: Passive Cooling of Buildings. James & James (Science Publishers Ltd.), England 1996
- [Seifert] Seifert, J.; Rösler, M.; Richter, W.; Hong Kong, Y. Li: Windinduzierte Lüftung in Gebäuden mit großen Öffnungen. HLH Bd. 55 (2004) Nr. 7, S. 30-33
- [Skåret] Skåret, E.: Industrial ventilation – model tests and general development in Norway and Scandinavia. Proc. Ventilation '85, Chemical Engineering Monograph, ed. H.D. Goddfellow, Elsevier, Amsterdam 1985
- [Stathopoulos] Stathopoulos, T.; Surry, D. ; Davenport, A.G. : Effective wind loads on flat roofs. Journal of Structural Division, 281-298, 1981
- [TU Dresden] Technische Universität Dresden. <http://www.tu-dresden.de/mw/ilr/homepage1.html>
- [v. d. Maas] van der Maas, J.; Bienfait, D.; Vandaale, L.; Walker, R.: Single Sided Ventilation. 12th AIVC Conference „Air Movement and Ventilation Control within Buildings“, Band 1, Ottawa, Canada, S. 73-98, 1991
- [Wacker] Wacker, J.: Datensammlung der in Windkanalversuchen gemessenen Windaußendrucke auf quaderförmige Gebäude in naturähnlichen Grenzschichtströmungen. Sonderforschungsbereich 210, Universität Karlsruhe, 1991
- [Wetter] Fa. Meteoronorm: Wetterdaten Berlin Tempelhof, 2004
- [Wilk] Wilk, E.; Kotthoff, I.: Brandsimulationsrechnungen. Gebäudetechnischer Brandschutz, Heft 3, S. 36-39 (2002)

- 
- [WTG] Windkanalversuche in der Gebäudeaerodynamik. Merkblatt der Windtechnologischen Gesellschaft (WTG), Entwurf, Aachen, 1993
- [Zargari] Zargari, M.: Messtechnische Bestimmung von Luftaustauschzahlen. Diplomarbeit, TU Braunschweig, Institut für Gebäude- und Solartechnik, 2003

## **Normen und Richtlinien**

- [E DIN 1055] E DIN 1055-4: Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 4: Windlasten, Ausgabe März 2001
- [DIN 1055] DIN 1055-4: Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 4: Windlasten, Ausgabe März 2005
- [ENV 1991-2-4] Eurocode 1: Basis of design and actions on structures, Part 2-4: Wind actions: CEN, European Committee for Standardization, 1994
- [DIN 1991] DIN EN 1991-1-4: Eurocode 1; Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 1-4, Allgemeine Einwirkungen, Windlasten; Ausgabe Juli 2005
- [DIN 1952] DIN 1952: Durchflussmessung mit Blenden, Düsen und Venturirohren in voll durchströmten Rohren mit Kreisquerschnitt, Ausgabe Juli 1982
- [EN 12569] EN ISO 12569, Bestimmung des Luftwechsels in Gebäuden – Indikatorgasverfahren, Ausgabe 2000
- [E DIN 16000] E DIN ISO 16000-8: Innenraumluftverunreinigungen – Teil 8: Bestimmung des lokalen Alters der Luft in Gebäuden zur Charakterisierung der Lüftungsbedingungen; Ausgabe Juni 2005
- [DIN 18232] DIN 18232-2: Rauch- und Wärmefreihaltung, Teil 2: Natürliche Rauchabzugsanlagen (NRA); Bemessung, Anforderungen und Einbau; Ausgabe Juni 2003
- [VDI 3783] VDI-Richtlinie 3783: Umweltmeteorologie, Physikalische Modellierung von Strömungs- und Ausbreitungsvorgängen in der atmosphärischen Grenzschicht, Windkanalanwendungen, Ausgabe Dezember 2000
- [BS 5925] BS 5925: Code of Practice for Design of Buildings: Ventilation principles and designing for natural ventilation. British Standards Institution, London, 1980

## Abbildungsverzeichnis

Bild 1.1: Einfluss der Bebauung [Moser].....	1
Bild 2.1: Beeinflussung der Umströmung des Gebäudes durch Luftaustausch mit dem Innenraum A: Fenster geschlossen, B: Fenster geöffnet) [Moser] .....	5
Bild 2.2: Bodengrenzschicht der Windströmung [Moser] .....	6
Bild 2.3: Windprofile in Abhängigkeit von der Geländeoberfläche [Moser].....	7
Bild 2.4: Vergleich der Ergebnisse von Modelluntersuchungen in verschiedenen Windkanälen; Ringversuch der WTG [TU Dresden].....	10
Bild 2.5: Abhängigkeit des Luftwiderstandsbeiwertes von der Reynolds-Zahl für ein Bauteil mit kantigem Grundriss (oben) und mit zylindrischem Grundriss (unten, bei verschiedenen Oberflächenrauigkeiten, nach Scruton, 1971).....	12
Bild 2.6: Abweichende Reynolds-Zahlen-Abhängigkeit bei kantiger (Platte) und runder Geometrie (Zylinder nach Simiu und Scanlan) (Bild 2.5 und 2.6: [GfA 2]) .....	12
Bild 2.7: Verlauf der Druckbeiwerte für unterschiedliche Jensen-Zahlen, nach Jensen, 1961 [GfA 2].....	14
Bild 3.1: Einfluss der Windturbulenz auf den Luftaustausch [Moser] .....	15
Bild 3.2: Grundformen der Raumströmung [Recknagel] .....	16
Bild 3.3: Zusammenhang zwischen Luftalter beim Austritt (Luftaustauschzeit) und mittlerem Luftalter in einer Zone bei einer idealen Verdrängungsströmung und einer vollständigen Mischströmung bei gleichem Luftwechsel .....	19
Bild 3.4: Modell für eine Messzone und ein Tracergas nach [Maas].....	20
Bild 3.5: Durchflusskoeffizienten für ein Klappfenster mit horizontaler Drehachse mit dünnem Fensterrahmen (links: $d = 5 \text{ mm}$ , $W = 1 \text{ m}$ ) und dickem Fensterrahmen (rechts: $d = 60 \text{ mm}$ , $W = 1 \text{ m}$ ) [ClimaSuisse].....	24
Bild 4.1: links: Nordost-Ansicht des Magazinegebäudes; rechts: Grundriss des Gebäudes .....	25
Bild 4.2: Lageplan.....	25
Bild 4.3: Luftaufnahme EnergieForum Berlin [Foto: Prof. Gockell; IGS TU Braunschweig] .....	26
Bild 4.4: Lüftungskonzept im Sommer .....	27
Bild 4.5: v. links n. rechts: Außenansicht Zuluftlamellen; Blick ins Atrium, Innenansicht Abluftlamellen .....	27
Bild 4.6: Blick ins Atrium; links: Blickrichtung Spree, Zuluftlamellen; rechts: Blickrichtung Magazinegebäude, Abluftlamellen.....	28
Bild 4.7: Temperaturfühler unter den Atriumbrücken .....	28
Bild 4.8: Regelstrategie der Zu-/Abluftlamellen im Atrium [Himmeler] .....	29
Bild 4.9: Prozentuale Häufigkeit der Außenlufttemperatur in 1 K-Schritten in 2004 (Lamellen geöffnet) .....	30
Bild 4.10: Atriumtemperatur im 2. und 5.OG bei geöffneten Lamellen in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur ; Messwerte aus dem Jahr 2004 .....	31
Bild 4.11: Prozentuale Häufigkeit der Temperaturdifferenz in 1 K-Schritten Atriumtemperatur im 2. und 5.OG bei geöffneten Lamellen – Außentemperatur .....	31
Bild 4.12: Schnitt durch das Atrium; Lage der Messfühler im 2. und 5. OG .....	32
Bild 4.13: Berechneter Luftwechsel in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen innen und außen; $c_D$ -Wert = 0,6.....	32
Bild 4.14: Atmosphärischer Grenzschichtwindkanal der ETH Zürich, Prinzip eines Windkanals in „Eiffel“-scher Bauart [GfA 2].....	33
Bild 4.15: Modell mit Druckentnahmebohrungen im Maßstab 1:100.....	34
Bild 4.16: Lage und Bezeichnung der Druckmessstellen am Modell .....	34
Bild 4.17: Änderung der Druckbeiwerte durch nach außen öffnende RWA-Klappen [K+L].....	35
Bild 5.1: Schema des Tracergasstroms innerhalb der Dosiereinheit Vivo Dosing [Dantec].....	37
Bild 5.2: links: Photoakustische Spektroskopie; rechts: Messstellenumschalter des TriGas-Analysators .....	37

Bild 5.3: links: VIVO Dosiereinheit und rechts: TriGas-Einheit .....	38
Bild 5.4: Schematische Darstellung des Schwefelhexafluorid-Moleküls .....	38
Bild 5.5: links: Messaufbau und rechts: Druckanzeige am Druckbegrenzer .....	39
Bild 5.6: SF <sub>6</sub> -Injektion auf Höhe der Zuluftlamellen .....	40
Bild 5.7: Längsschnitt durch das Atrium; Lage der Messpunkte .....	40
Bild 5.8: Messpunkte an den Geländern der Atriumtreppe P1-P3 .....	41
Bild 5.9: Messpunkte im Traufbereich des Magazindaches P1-P3 .....	41
Bild 5.10: Messpunkte an den Geländern der Atriumbrücken P1-P3 .....	41
Bild 5.11: links: Windgeschwindigkeit; rechts: Windrichtung .....	42
Bild 5.12: Raumlufthemperaturverlauf im Atrium während der Messung .....	42
Bild 5.13: Zeitlicher Verlauf der SF <sub>6</sub> -Injektion .....	43
Bild 5.14: Konzentrationsverlauf an den Messpunkten Treppengeländer .....	43
Bild 5.15: Konzentrationsverlauf an den Messpunkten Magazindach .....	44
Bild 5.16: Konzentrationsverlauf an den Messpunkten Atriumbrücken .....	44
Bild 5.17: Konzentrationsverlauf an ausgewählten Messpunkten bei geschlossenen Lamellen → Konzentrationsabbau infolge von Infiltration .....	45
Bild 5.18: Konzentrationsverlauf an ausgewählten Messpunkten bei geöffneten Lamellen .....	45
Bild 5.19: links: Windrichtung; rechts Wetterstation .....	47
Bild 5.20: Raumlufthemperaturverlauf im Atrium während der Messung; Foto: Temperaturmessung im Atrium .....	47
Bild 5.21: Konzentrationsverlauf an ausgewählten Messpunkten bei geöffneten Lamellen .....	48
Bild 5.22: Windrichtung .....	49
Bild 5.23: Raumlufthemperaturverlauf im Atrium während der Messung .....	49
Bild 5.24: Konzentrationsverlauf an ausgewählten Messpunkten bei geöffneten Lamellen .....	50
Bild 5.25: links: Abklingkurve Messung in der Übergangszeit: $r = -0,99497$ ; rechts: Abklingkurve Messung im Sommer: $r = -0,99298$ .....	52
Bild 5.26: Sommermessung: Rel. Fehler in Abhängigkeit des Auswertezitraums .....	53
Bild 6.1: Vergleich der $c_{p,mean}$ -Werte entlang charakteristischer Horizontal- und Vertikalschnitte mit Daten aus der Literatur [Kiefer] .....	56
Bild 6.2: Definition der Anströmrichtungen für die Isoliniendarstellung .....	57
Bild 6.3: $c_p$ -Werte kurze Seitenwände; oben: Ergebnisse von [Kiefer]; unten: Ergebnisse Simulation .....	57
Bild 6.4: $c_p$ -Werte lange Seitenwände I; oben: Ergebnisse von [Kiefer]; unten: Ergebnisse Simulation .....	58
Bild 6.5: $c_p$ -Werte lange Seitenwände II; oben: Ergebnisse von [Kiefer]; unten: Ergebnisse Simulation .....	58
Bild 6.6: $c_p$ -Werte lange Seitenwände III; oben: Ergebnisse von [Kiefer]; unten: Ergebnisse Simulation .....	58
Bild 6.7: $c_p$ -Werte Dachfläche; links: Ergebnisse von [Kiefer]; rechts: Ergebnisse Simulation .....	59
Bild 6.8: Simulationsmodell analog zum Windkanalmodell zur Kalibrierung durch vorhandene Messwerte (nur Außenfläche des Gebäudes) .....	60
Bild 6.9: links: Anordnung der Windsektoren in der Simulation und rechts: Lage des Gebäudemodells .....	60
Bild 6.10: Anströmprofil im Simulationsmodell mit einem Proflexponenten von $\alpha = 0,31$ und einer Referenzgeschwindigkeit von 1 m/s in 10 m Höhe .....	61
Bild 6.11: Lage der Messpunkte links: West- und rechts: Südfassade [K+L] .....	62
Bild 6.12: Druckbeiwerte an den Messpunkten West- und Südfassade und auf dem Dach, Windrichtung West [K+L]; links: Simulation, rechts: Messwerte als Oberflächendiagramm (außer Westwand) .....	62
Bild 6.13: Statischer Druckverlauf bei unterschiedlichen Turbulenzgraden in der Anströmung .....	63
Bild 6.14: Statischer Druckverlauf entlang einer vertikalen Achse an der Westfassade bei unterschiedlichen Turbulenzgraden in der Anströmung .....	63
Bild 6.15: links: Definition der Anströmrichtungen; rechts: Gebäudemodell des Energieforums .....	64
Bild 6.16: Simulationsergebnisse der Luftwechselberechnung und Darstellung der Regressionsgeraden .....	65

Bild 6.17: Diagramm zur Ermittlung des Luftwechsels als Funktion der Windrichtung, der Windgeschwindigkeit und der geöffneten Fensterfläche .....	66
Bild 6.18: Diagramm zur Ermittlung des Luftwechsels als Funktion der Windrichtung, der Windgeschwindigkeit und der geöffneten Fensterfläche → Anwendung .....	67
Bild 6.19: Ermittlung der wirksamen Druckdifferenz $\Delta p_{\text{stat}}$ an einem geschlossenen (links) und an einem durchströmten Baukörper (rechts) .....	68
Bild 6.20: Luftwechsel in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit; Vergleich der Ergebnisse aus Simulation und Berechnungen nach BSM (Druckverteilung geöffnete und geschlossene Fassade), Anströmrichtung $0^\circ$ ...	69
Bild 6.21: Luftwechsel in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit; Vergleich der Ergebnisse aus Simulation und Berechnungen nach BSM (Druckverteilung geöffnete und geschlossene Fassade), Anströmrichtung $45^\circ$ .	69
Bild 6.22: Verteilung des statischen Druckes im Bereich der Zu- und Abluftlamellen; oben: Zuluft geöffnet, unten: Abluft geöffnet; Anströmrichtung $0^\circ$ ; $u = 3 \text{ m/s}$ .....	70
Bild 6.23: Verteilung des statischen Druckes im Bereich der Zu- und Abluftlamellen; oben: Zuluft geschlossen, unten: Abluft geschlossen; Anströmrichtung $0^\circ$ ; $u = 3 \text{ m/s}$ .....	70
Bild 6.24: Luftaustauschwirkungsgrad abhängig von der Windgeschwindigkeit und dem Öffnungsanteil der Zu- und Abluftfläche; Anströmrichtung $0^\circ$ .....	71
Bild 6.25: Luftaustauschwirkungsgrad abhängig von der Windgeschwindigkeit und dem Öffnungsanteil der Zu- und Abluftfläche; Anströmrichtung $0^\circ$ .....	72
Bild 6.26: Verteilung des lokalen Luftalters bei zunehmendem Öffnungsanteil der Zu- und Abluftfläche; Anströmrichtung $0^\circ$ , Windgeschwindigkeit $1 \text{ m/s}$ .....	73
Bild 6.27: Verteilung des lokalen Luftalters bei konstantem Öffnungsanteil der Zu- und Abluftfläche; Anströmrichtung $0^\circ$ , Windgeschwindigkeit 2 bis $5 \text{ m/s}$ .....	74
Bild 6.28: Verteilung der lokalen Luftaustauschindizes bei konstantem Öffnungsanteil der Zu- und Abluftfläche; Anströmrichtung $0^\circ$ , Windgeschwindigkeit 2 bis $5 \text{ m/s}$ .....	75
Bild 7.1: Diagramm zur Ermittlung des Luftwechsels als Funktion der Windrichtung, der Windgeschwindigkeit und der geöffneten Fensterfläche .....	76
Bild 7.2: Lage der horizontalen Darstellungsebenen in 3 m, 19 m und 20 m Höhe .....	77
Bild 7.3: Verteilung des lokalen Luftalters (links) und des Luftaustauschindex (rechts) in 3 m, 19 m und 20 m Höhe; Windgeschwindigkeit $2,3 \text{ m/s}$ ; Anströmrichtung $315^\circ$ .....	78
Bild 7.4: Darstellung der Randbedingungen für die Berechnungen nach British Standard Method .....	79
Bild 7.5: Verteilung des statischen Druckes im Bereich der geöffneten Zu- und Abluftlamellen; oben: Zuluft, unten: Abluft; Anströmrichtung $315^\circ$ ; $u = 2,3 \text{ m/s}$ .....	79
Bild 7.6: Diagramm zur Ermittlung des Luftwechsels als Funktion der Windrichtung, der Windgeschwindigkeit und der geöffneten Fensterfläche .....	80
Bild 7.7: Verteilung des lokalen Luftalters (links) und des Luftaustauschindex (rechts) in 3 m, 19 m und 20 m Höhe; Windgeschwindigkeit $2,7 \text{ m/s}$ ; Anströmrichtung $225^\circ$ .....	82
Bild 7.8: Darstellung der Randbedingungen für die Berechnungen nach British Standard Method .....	83
Bild 7.9: Verteilung des statischen Druckes im Bereich der geöffneten Zu- und Abluftlamellen; oben: Zuluft, unten: Abluft; Anströmrichtung $225^\circ$ ; $u = 2,7 \text{ m/s}$ .....	83
Bild 7.10: Darstellung der Randbedingungen für die Berechnung nach BSM ( $c_D = 0,6$ ) .....	84
Bild 7.11: Raumlufttemperaturverlauf im Atrium während der Messung .....	84
Bild 7.12: Thermografieaufnahme des Magazingebäudes (Innenansicht Atrium) .....	85
Bild 7.13: Thermografieaufnahme der Seitenwand und des Daches (Innenansicht Atrium) .....	85
Bild 7.14: Atriumteilmodell ohne angrenzende Gebäudeteile .....	85
Bild 7.15: Instationärer Temperaturverlauf im Atrium während des Abklingversuches (Längsschnitt in Raummitte) .....	86
Bild 7.16: Prozentuale Häufigkeit der aufgetretenen Windrichtungen – Stundenmittelwerte .....	88

Bild 7.17: Prozentuale Häufigkeit der aufgetretenen Windrichtungen – Stundenmittelwerte; $T_a \geq 14^\circ\text{C}$ .....	90
Bild 8.1: Definition der Anströmrichtungen .....	91
Bild 8.2: v. links n. rechts: Schnitt durch das Gebäude; Ansicht; Atriumvolumen.....	92
Bild 8.3: Darstellung der geöffneten Abluftflächen; links: Anströmrichtung $0^\circ$ und $180^\circ$ , rechts: $90^\circ$ .....	92
Bild 8.4: Darstellung der geöffneten Abluftflächen; Anströmrichtung $45^\circ$ und $135^\circ$ .....	93
Bild 8.5: Diagramm zur Ermittlung des Luftwechsels als Funktion der Windrichtung, der Windgeschwindigkeit und der geöffneten Fensterfläche.....	93
Bild 8.6: Verteilung des lokalen Luftalters (links) und des Luftaustauschindex (rechts); Windgeschwindigkeit 5 m/s; Anströmrichtung $0^\circ$ ; Öffnungsanteil 100 % .....	94
Bild 8.7: Verteilung des lokalen Luftalters (links) und des Luftaustauschindex (rechts); Windgeschwindigkeit 5 m/s; Anströmrichtung $45^\circ$ ; Öffnungsanteil 100 % .....	94
Bild 8.8: Verteilung des lokalen Luftalters (links) und des Luftaustauschindex (rechts); Windgeschwindigkeit 5 m/s; Anströmrichtung $90^\circ$ ; Öffnungsanteil 100 % .....	95
Bild 8.9: Verteilung des lokalen Luftalters (links) und des Luftaustauschindex (rechts); Windgeschwindigkeit 5 m/s; Anströmrichtung $135^\circ$ ; Öffnungsanteil 100 % .....	95
Bild 8.10: Verteilung des lokalen Luftalters (links) und des Luftaustauschindex (rechts); Windgeschwindigkeit 5 m/s; Anströmrichtung $180^\circ$ ; Öffnungsanteil 100 % .....	95
Bild 8.11: Diagramm zur Ermittlung des Luftwechsels als Funktion der Windrichtung, der Windgeschwindigkeit und der geöffneten Fensterfläche.....	96
Bild 8.12: Verteilung des lokalen Luftalters (links) und des Luftaustauschindex (rechts); Windgeschwindigkeit 4 m/s; Anströmrichtung $180^\circ$ ; Öffnungsanteil 75 % .....	97
Bild 8.13: Diagramm zur Ermittlung des Luftwechsels als Funktion der Windrichtung, der Windgeschwindigkeit und der geöffneten Fensterfläche.....	98
Bild 8.14: Verteilung der Luftaustauschindex; oben links: Windgeschwindigkeit 1 m/s; oben rechts: Windgeschwindigkeit 3 m/s; unten links: Windgeschwindigkeit 5 m/s Anströmrichtung $180^\circ$ ; Öffnungsanteil 100 %.....	99
Bild C1: Luftaustauschwirkungsgrad abhängig von der Windgeschwindigkeit und dem Öffnungsanteil der Zu- und Abluftfläche; Anströmrichtung $0^\circ$ .....	130
Bild C2: Luftaustauschwirkungsgrad abhängig von der Windgeschwindigkeit und dem Öffnungsanteil der Zu- und Abluftfläche; Anströmrichtung $45^\circ$ .....	130
Bild C3: Luftaustauschwirkungsgrad abhängig von der Windgeschwindigkeit und dem Öffnungsanteil der Zu- und Abluftfläche; Anströmrichtung $90^\circ$ .....	131
Bild C4: Luftaustauschwirkungsgrad abhängig von der Windgeschwindigkeit und dem Öffnungsanteil der Zu- und Abluftfläche; Anströmrichtung $135^\circ$ .....	131
Bild C5: Luftaustauschwirkungsgrad abhängig von der Windgeschwindigkeit und dem Öffnungsanteil der Zu- und Abluftfläche; Anströmrichtung $180^\circ$ .....	132
Bild C6: Luftaustauschwirkungsgrad abhängig von der Windgeschwindigkeit und dem Öffnungsanteil der Zu- und Abluftfläche; Anströmrichtung $225^\circ$ .....	132
Bild C7: Luftaustauschwirkungsgrad abhängig von der Windgeschwindigkeit und dem Öffnungsanteil der Zu- und Abluftfläche; Anströmrichtung $270^\circ$ .....	133
Bild C8: Luftaustauschwirkungsgrad abhängig von der Windgeschwindigkeit und dem Öffnungsanteil der Zu- und Abluftfläche; Anströmrichtung $315^\circ$ .....	133
Bild D1: Einteilung der Wand- und Dachflächen bei Flachdächern mit scharfkantigem Traufbereich (Auszug DIN 1055-4:2005-03, vereinfachte Darstellung) .....	134

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Rauigkeitslängen, Profilexponenten und Nullpunktverschiebungen [VDI 3783] .....	8
Tabelle 4.1: Prozentuale Häufigkeit der Außenlufttemperatur in 1 K-Schritten in 2004 (Lamellen geöffnet) .....	30
Tabelle 5.1: Luftwechsel nach der Konzentrationsabfall-Methode .....	46
Tabelle 5.2: Luftwechsel berechnet aus der nominalen Zeitkonstante .....	46
Tabelle 5.3: Luftwechsel nach der Konzentrationsabfall-Methode .....	48
Tabelle 5.4: Luftwechsel berechnet aus der nominalen Zeitkonstante .....	48
Tabelle 5.5: Luftwechsel nach der Konzentrationsabfall-Methode .....	50
Tabelle 5.6: Luftwechsel berechnet aus der nominalen Zeitkonstante .....	51
Tabelle 5.7: Randbedingungen und Ergebnisse der Luftwechseluntersuchungen .....	51
Tabelle 6.1: Grenzschichtparameter der verglichenen Untersuchungen [Kiefer] .....	55
Tabelle 6.2: Druckbeiwerte an den Messpunkten West- und Südfassade, Windrichtung West [K+L] .....	61
Tabelle 6.3: Korrelationskoeffizienten und Standardabweichung der Ausgleichsgraden .....	65
Tabelle 6.4: Luftwechsel in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit; Vergleich Ergebnisse Simulation und Berechnungen nach BSM (Druckverteilung geöffnete und geschlossene Fassade) .....	68
Tabelle 7.1: Ergebnisse der Luftwechselbestimmung aus Versuch, Simulation und Berechnung .....	79
Tabelle 7.2: Ergebnisse der Luftwechselbestimmung aus Versuch, Simulation und Berechnung .....	83
Tabelle 7.3: Luftwechsel infolge Wind bzw. Thermik nach Gleichung 3.9 und 3.10 .....	87
Tabelle 7.4: Ergebnisse der Luftwechselbestimmung aus Versuch, Simulation und Berechnung .....	87
Tabelle 7.5: Prozentuale Häufigkeit der aufgetretenen Windrichtungen – Stundenmittelwerte .....	88
Tabelle 7.6: Prozentuale Häufigkeit einer bestimmten Windgeschwindigkeit für die Hauptwindrichtungen .....	89
Tabelle 7.7: Prozentuale Häufigkeit einer bestimmten Windgeschwindigkeit und –richtung .....	89
Tabelle 7.8: Luftwechsel für verschiedene Windrichtungen und -geschwindigkeiten, Lamellen 100 % offen ....	89
Tabelle 7.9: Prozentuale Häufigkeit der aufgetretenen Windrichtungen – Stundenmittelwerte; $T_a \geq 14^\circ\text{C}$ .....	90
Tabelle 7.10: Prozentuale Häufigkeit einer bestimmten Windgeschwindigkeit und –richtung; $T_a \geq 14^\circ\text{C}$ .....	90
Tabelle 8.1: Ergebnisse aus der Simulation; Windgeschwindigkeit 5 m/s .....	93
Tabelle 8.2: Luftwechsel für verschiedene Windrichtungen und -geschwindigkeiten aus Diagramm 8.10 .....	96
Tabelle 8.3: Ergebnis aus der Simulation; Windgeschwindigkeit 4 m/s; Öffnungsanteil 75 % .....	97
Tabelle 8.4: Simulationsergebnisse; Windgeschwindigkeit 1 bis 5 m/s; Anströmrichtung $180^\circ$ ; Öffnungsanteil 100% .....	98
Tabelle A1: Zusammenstellung der Simulationsergebnisse; Anströmrichtung $0^\circ$ .....	114
Tabelle A2: Zusammenstellung der Simulationsergebnisse; Anströmrichtung $45^\circ$ .....	115
Tabelle A3: Zusammenstellung der Simulationsergebnisse; Anströmrichtung $90^\circ$ .....	116
Tabelle A4: Zusammenstellung der Simulationsergebnisse; Anströmrichtung $135^\circ$ .....	117
Tabelle A5: Zusammenstellung der Simulationsergebnisse; Anströmrichtung $180^\circ$ .....	118
Tabelle A6: Zusammenstellung der Simulationsergebnisse; Anströmrichtung $225^\circ$ .....	119
Tabelle A7: Zusammenstellung der Simulationsergebnisse; Anströmrichtung $270^\circ$ .....	120
Tabelle A8: Zusammenstellung der Simulationsergebnisse; Anströmrichtung $315^\circ$ .....	121
Tabelle B1: Wind aus Norden .....	122
Tabelle B2: Wind aus Nordosten .....	123
Tabelle B3: Wind aus Osten .....	124
Tabelle B4: Wind aus Südosten .....	125
Tabelle B5: Wind aus Süden .....	126
Tabelle B6: Wind aus Südwesten .....	127
Tabelle B7: Wind aus Westen .....	128
Tabelle B8: Wind aus Nordwesten .....	129



## Anhang

### A: Simulationsergebnisse

#### A1: Anströmrichtung 0°

Windgeschwindigkeit 1 [m/s]	Öffnungsanteil		25%	50%	75%	100%
	Luftwechsel	[1/h]	0,8	1,55	2,29	2,93
	Mittleres Luftalter	[s]	3979	3111	2381	2055
	Luftaustauschwirkungsgrad	[-]	0,546	0,37	0,33	0,3
Windgeschwindigkeit 2 [m/s]	Öffnungsanteil		25%	50%	75%	100%
	Luftwechsel	[1/h]	1,5	2,95	4,23	5,59
	Mittleres Luftalter	[s]	2372	1611	1274	1083
	Luftaustauschwirkungsgrad	[-]	0,51	0,38	0,33	0,3
Windgeschwindigkeit 3 [m/s]	Öffnungsanteil		25%	50%	75%	100%
	Luftwechsel	[1/h]	2,16	4,27	6,14	8,1
	Mittleres Luftalter	[s]	1636	1113	881	736
	Luftaustauschwirkungsgrad	[-]	0,51	0,38	0,33	0,31
Windgeschwindigkeit 4 [m/s]	Öffnungsanteil		25%	50%	75%	100%
	Luftwechsel	[1/h]	2,81	5,53	8	10,54
	Mittleres Luftalter	[s]	1272	858	674	576
	Luftaustauschwirkungsgrad	[-]	0,5	0,38	0,33	0,3
Windgeschwindigkeit 5 [m/s]	Öffnungsanteil		25%	50%	75%	100%
	Luftwechsel	[1/h]	3,44	6,82	9,83	12,89
	Mittleres Luftalter	[s]	1005	685	536	451
	Luftaustauschwirkungsgrad	[-]	0,52	0,39	0,34	0,31

Tabelle A1: Zusammenstellung der Simulationsergebnisse; Anströmrichtung 0°

**A2: Anströmrichtung 45°**

Windgeschwindigkeit 1 [m/s]	Öffnungsanteil		25%	50%	75%	100%
	Luftwechsel	[1/h]	0,92	1,75	2,51	3,13
	Mittleres Luftalter	[s]	3548	2271	1780	1557
	Luftaustauschwirkungsgrad	[-]	0,55	0,45	0,42	0,37
Windgeschwindigkeit 2 [m/s]	Öffnungsanteil		25%	50%	75%	100%
	Luftwechsel	[1/h]	1,74	3,32	4,6	5,94
	Mittleres Luftalter	[s]	1889	1205	932	813
	Luftaustauschwirkungsgrad	[-]	0,55	0,45	0,42	0,37
Windgeschwindigkeit 3 [m/s]	Öffnungsanteil		25%	50%	75%	100%
	Luftwechsel	[1/h]	2,52	4,88	6,94	8,95
	Mittleres Luftalter	[s]	1302	823	638	548
	Luftaustauschwirkungsgrad	[-]	0,55	0,45	0,41	0,37
Windgeschwindigkeit 4 [m/s]	Öffnungsanteil		25%	50%	75%	100%
	Luftwechsel	[1/h]	3,32	6,45	9,11	11,65
	Mittleres Luftalter	[s]	996	613	484	415
	Luftaustauschwirkungsgrad	[-]	0,54	0,45	0,41	0,37
Windgeschwindigkeit 5 [m/s]	Öffnungsanteil		25%	50%	75%	100%
	Luftwechsel	[1/h]	4,09	8,11	11,2	14,38
	Mittleres Luftalter	[s]	797	500	395	335
	Luftaustauschwirkungsgrad	[-]	0,55	0,44	0,41	0,37

**Tabelle A2: Zusammenstellung der Simulationsergebnisse; Anströmrichtung 45°**

**A3: Anströmrichtung 90°**

Windgeschwindigkeit 1 [m/s]	Öffnungsanteil		25%	50%	75%	100%
	Luftwechsel	[1/h]	0,2	0,86	1,22	1,48
	Mittleres Luftalter	[s]	13432	3764	3463	3110
	Luftaustauschwirkungsgrad	[-]	0,68	0,55	0,42	0,39
Windgeschwindigkeit 2 [m/s]	Öffnungsanteil		25%	50%	75%	100%
	Luftwechsel	[1/h]	0,9	1,57	2,17	2,6
	Mittleres Luftalter	[s]	2745	2372	2021	1744
	Luftaustauschwirkungsgrad	[-]	0,73	0,48	0,41	0,4
Windgeschwindigkeit 3 [m/s]	Öffnungsanteil		25%	50%	75%	100%
	Luftwechsel	[1/h]	1,04	2,01	2,82	3,34
	Mittleres Luftalter	[s]	2780	1915	1494	1302
	Luftaustauschwirkungsgrad	[-]	0,62	0,47	0,43	0,41
Windgeschwindigkeit 4 [m/s]	Öffnungsanteil		25%	50%	75%	100%
	Luftwechsel	[1/h]	1,14	2,18	3,06	3,58
	Mittleres Luftalter	[s]	2492	1689	1266	1128
	Luftaustauschwirkungsgrad	[-]	0,63	0,49	0,46	0,45
Windgeschwindigkeit 5 [m/s]	Öffnungsanteil		25%	50%	75%	100%
	Luftwechsel	[1/h]	2,36	1,94	2,66	3,28
	Mittleres Luftalter	[s]	1148	1543	1195	1061
	Luftaustauschwirkungsgrad	[-]	0,67	0,6	0,57	0,52

**Tabelle A3: Zusammenstellung der Simulationsergebnisse; Anströmrichtung 90°**

**A4: Anströmrichtung 135°**

Windgeschwindigkeit 1 [m/s]	Öffnungsanteil		25%	50%	75%	100%
	Luftwechsel	[1/h]	0,33	0,68	0,99	1,26
	Mittleres Luftalter	[s]	7665	4430	3648	3069
	Luftaustauschwirkungsgrad	[-]	0,72	0,6	0,5	0,47
Windgeschwindigkeit 2 [m/s]	Öffnungsanteil		25%	50%	75%	100%
	Luftwechsel	[1/h]	0,43	1,2	1,33	1,72
	Mittleres Luftalter	[s]	6203	2744	2503	2118
	Luftaustauschwirkungsgrad	[-]	0,67	0,55	0,54	0,51
Windgeschwindigkeit 3 [m/s]	Öffnungsanteil		25%	50%	75%	100%
	Luftwechsel	[1/h]	0,58	1,92	2,64	3,53
	Mittleres Luftalter	[s]	4556	1826	1363	1114
	Luftaustauschwirkungsgrad	[-]	0,68	0,51	0,5	0,46
Windgeschwindigkeit 4 [m/s]	Öffnungsanteil		25%	50%	75%	100%
	Luftwechsel	[1/h]	1,82	2,99	1,96	4,22
	Mittleres Luftalter	[s]	1369	1211	1659	912
	Luftaustauschwirkungsgrad	[-]	0,72	0,5	0,55	0,47
Windgeschwindigkeit 5 [m/s]	Öffnungsanteil		25%	50%	75%	100%
	Luftwechsel	[1/h]	1,72	3,47	5,96	6,8
	Mittleres Luftalter	[s]	1633	1151	746	644
	Luftaustauschwirkungsgrad	[-]	0,64	0,45	0,41	0,41

**Tabelle A4: Zusammenstellung der Simulationsergebnisse; Anströmrichtung 135°**

**A5: Anströmrichtung 180°**

Windgeschwindigkeit 1 [m/s]	Öffnungsanteil		25%	50%	75%	100%
	Luftwechsel	[1/h]	0,51	0,63	1,12	2,02
	Mittleres Luftalter	[s]	6261	6726	4116	2867
	Luftaustauschwirkungsgrad	[-]	0,56	0,43	0,39	0,31
Windgeschwindigkeit 2 [m/s]	Öffnungsanteil		25%	50%	75%	100%
	Luftwechsel	[1/h]	0,89	1,75	1,92	1,3
	Mittleres Luftalter	[s]	2975	2203	2312	2959
	Luftaustauschwirkungsgrad	[-]	0,68	0,47	0,41	0,47
Windgeschwindigkeit 3 [m/s]	Öffnungsanteil		25%	50%	75%	100%
	Luftwechsel	[1/h]	0,83	2,02	2,56	0,78
	Mittleres Luftalter	[s]	3600	1871	1374	4382
	Luftaustauschwirkungsgrad	[-]	0,6	0,48	0,51	0,52
Windgeschwindigkeit 4 [m/s]	Öffnungsanteil		25%	50%	75%	100%
	Luftwechsel	[1/h]	1,88	1,55	2,1	2,43
	Mittleres Luftalter	[s]	1546	2307	1727	1992
	Luftaustauschwirkungsgrad	[-]	0,57	0,5	0,5	0,37
Windgeschwindigkeit 5 [m/s]	Öffnungsanteil		25%	50%	75%	100%
	Luftwechsel	[1/h]	1,26	3,23	4,27	2,73
	Mittleres Luftalter	[s]	2042	1070	858	1398
	Luftaustauschwirkungsgrad	[-]	0,7	0,52	0,49	0,47

**Tabelle A5: Zusammenstellung der Simulationsergebnisse; Anströmrichtung 180°**

**A6: Anströmrichtung 225°**

Windgeschwindigkeit 1 [m/s]	Öffnungsanteil		25%	50%	75%	100%
	Luftwechsel	[1/h]	0,28	0,64	0,9	1,15
	Mittleres Luftalter	[s]	9462	4528	3714	3306
	Luftaustauschwirkungsgrad	[-]	0,69	0,62	0,54	0,48
Windgeschwindigkeit 2 [m/s]	Öffnungsanteil		25%	50%	75%	100%
	Luftwechsel	[1/h]	0,49	1,28	1,29	1,46
	Mittleres Luftalter	[s]	6603	2882	3055	2379
	Luftaustauschwirkungsgrad	[-]	0,56	0,49	0,46	0,52
Windgeschwindigkeit 3 [m/s]	Öffnungsanteil		25%	50%	75%	100%
	Luftwechsel	[1/h]	0,83	2,28	3,77	4,53
	Mittleres Luftalter	[s]	2857	1605	1247	1112
	Luftaustauschwirkungsgrad	[-]	0,76	0,49	0,38	0,37
Windgeschwindigkeit 4 [m/s]	Öffnungsanteil		25%	50%	75%	100%
	Luftwechsel	[1/h]	1,5	3,41	4,53	5,85
	Mittleres Luftalter	[s]	2079	1275	918	940
	Luftaustauschwirkungsgrad	[-]	0,6	0,41	0,43	0,33
Windgeschwindigkeit 5 [m/s]	Öffnungsanteil		25%	50%	75%	100%
	Luftwechsel	[1/h]	1,27	4,44	4,99	5,55
	Mittleres Luftalter	[s]	2130	823	740	738
	Luftaustauschwirkungsgrad	[-]	0,66	0,49	0,49	0,44

**Tabelle A6: Zusammenstellung der Simulationsergebnisse; Anströmrichtung 225°**

**A7: Anströmrichtung 270°**

Windgeschwindigkeit 1 [m/s]	Öffnungsanteil		25%	50%	75%	100%
	Luftwechsel	[1/h]	0,42	0,83	1,2	1,44
	Mittleres Luftalter	[s]	6325	4489	3520	3086
	Luftaustauschwirkungsgrad	[-]	0,68	0,49	0,43	0,41
Windgeschwindigkeit 2 [m/s]	Öffnungsanteil		25%	50%	75%	100%
	Luftwechsel	[1/h]	0,74	1,42	2,01	2,45
	Mittleres Luftalter	[s]	4126	2698	2103	1829
	Luftaustauschwirkungsgrad	[-]	0,59	0,47	0,42	0,4
Windgeschwindigkeit 3 [m/s]	Öffnungsanteil		25%	50%	75%	100%
	Luftwechsel	[1/h]	0,93	1,77	2,42	2,87
	Mittleres Luftalter	[s]	3195	2124	1695	1474
	Luftaustauschwirkungsgrad	[-]	0,61	0,48	0,44	0,43
Windgeschwindigkeit 4 [m/s]	Öffnungsanteil		25%	50%	75%	100%
	Luftwechsel	[1/h]	1,02	1,9	2,55	2,94
	Mittleres Luftalter	[s]	2839	1850	1446	1311
	Luftaustauschwirkungsgrad	[-]	0,62	0,51	0,49	0,47
Windgeschwindigkeit 5 [m/s]	Öffnungsanteil		25%	50%	75%	100%
	Luftwechsel	[1/h]	0,97	1,68	2,71	2,91
	Mittleres Luftalter	[s]	2745	1660	1259	1187
	Luftaustauschwirkungsgrad	[-]	0,68	0,65	0,53	0,53

**Tabelle A7: Zusammenstellung der Simulationsergebnisse; Anströmrichtung 270°**

**A8: Anströmrichtung 315°**

Windgeschwindigkeit 1 [m/s]	Öffnungsanteil		25%	50%	75%	100%
	Luftwechsel	[1/h]	0,89	1,76	2,5	3,1
	Mittleres Luftalter	[s]	3785	2275	1823	1502
	Luftaustauschwirkungsgrad	[-]	0,53	0,45	0,4	0,39
Windgeschwindigkeit 2 [m/s]	Öffnungsanteil		25%	50%	75%	100%
	Luftwechsel	[1/h]	1,77	3,46	4,74	6,23
	Mittleres Luftalter	[s]	1944	1193	952	778
	Luftaustauschwirkungsgrad	[-]	0,52	0,44	0,4	0,37
Windgeschwindigkeit 3 [m/s]	Öffnungsanteil		25%	50%	75%	100%
	Luftwechsel	[1/h]	2,58	4,57	7,08	9,03
	Mittleres Luftalter	[s]	1344	895	630	543
	Luftaustauschwirkungsgrad	[-]	0,52	0,44	0,4	0,37
Windgeschwindigkeit 4 [m/s]	Öffnungsanteil		25%	50%	75%	100%
	Luftwechsel	[1/h]	3,5	6,26	8,75	11,8
	Mittleres Luftalter	[s]	964	647	450	392
	Luftaustauschwirkungsgrad	[-]	0,53	0,44	0,46	0,39
Windgeschwindigkeit 5 [m/s]	Öffnungsanteil		25%	50%	75%	100%
	Luftwechsel	[1/h]	4,34	7,89	11,42	13,84
	Mittleres Luftalter	[s]	787	509	393	352
	Luftaustauschwirkungsgrad	[-]	0,53	0,45	0,4	0,37

**Tabelle A8: Zusammenstellung der Simulationsergebnisse; Anströmrichtung 315°**



## B: Ergebnisse der Windkanaluntersuchung [K+L]

Messpunkte	c <sub>p</sub> -Werte	Messpunkte	c <sub>p</sub> -Werte
AH 1-1	-1,13	FS 1-1	-0,69
AH 1-2	-1,1	FS 1-2	-0,63
AH 1-3	-1,1	FS 2-1	-0,6
AH 2-1	-1,1	FS 2-2	-0,6
AH 2-2	-1,1	FS 2-3	-0,57
AH 2-3	-1,07	FS 2-4	-0,63
AV 1-1	-1,01	FS 3-1	-0,6
AV 1-2	-1,07	FS 3-2	-0,6
AV 1-3	-1,1	FS 3-3	-0,63
AV 1-4	-1,04	FS 3-4	-0,63
AV 1-5	-1,17	FS 4-1	-0,57
AV 2-1	-1,01	FS 4-2	-0,57
AV 2-2	-1,13	FS 4-3	-0,57
AV 2-3	-1,13	FS 4-4	-0,54
AV 2-4	-1,1	FS 5-1	-0,54
D 1-1	-0,13	FS 5-2	-0,54
D 1-2	-1,07	FS 5-3	-0,5
D 1-3	-1,04	FS 5-4	-0,5
D 1-4	-0,98	FW 1-1	-0,79
D 2-1	-1,32	FW 2-1	-1,32
D 2-2	-1,07	FW 2-2	-0,13
D 2-3	-1,04	FW 3-1	0,76
D 2-4	-0,91	FW 4-1	0,41
D 2-5	-0,88	FW 4-2	0,82
D 3-1	-1,51	FW 5-1	1
D 3-2	-0,88	FO 1-1	-0,76
D 3-3	-0,85	FO 2-1	-0,85
D 3-4	-0,85	FO 2-2	-0,72
D 4-1	-1,26	FO 2-3	-0,72
D 4-2	-0,5	FO 2-4	-0,76
D 4-3	-0,66	FO 3-1	-0,6
D 4-4	-0,69	FO 3-2	-0,54
D 5-1	-0,82	FO 4-1	-0,54
D 5-2	-0,44	FO 5-1	-0,72
D 5-3	-0,5	FO 6-1	-0,79
D 6-1	-0,85	FO 6-2	-0,76
D 6-2	-0,79	FO 6-3	-1,01
D 6-3	-0,63	FO 7-1	-0,82
D 6-4	-0,54	FO 7-2	-0,79
D 6-5	-0,5	FO 7-3	-0,57
D 7-1	-0,85	EN 1-1	0,63
D 7-2	-0,76	EN 2-1	0,82
D 7-3	-0,69		
D 7-4	-0,63		

Tabelle B1: Wind aus Norden

Messpunkte	c <sub>p</sub> -Werte	Messpunkte	c <sub>p</sub> -Werte
AH 1-1	-1,35	FS 1-1	-0,76
AH 1-2	-1,32	FS 1-2	-0,72
AH 1-3	-1,32	FS 2-1	-0,63
AH 2-1	-1,29	FS 2-2	-0,6
AH 2-2	-1,29	FS 2-3	-0,57
AH 2-3	-1,32	FS 2-4	-0,57
AV 1-1	-1,26	FS 3-1	-0,6
AV 1-2	-1,35	FS 3-2	-0,57
AV 1-3	-1,32	FS 3-3	-0,57
AV 1-4	-1,23	FS 3-4	-0,54
AV 1-5	-1,29	FS 4-1	-0,57
AV 2-1	-1,32	FS 4-2	-0,5
AV 2-2	-1,32	FS 4-3	-0,47
AV 2-3	-1,29	FS 4-4	-0,5
AV 2-4	-1,26	FS 5-1	-0,54
D 1-1	-1,32	FS 5-2	-0,54
D 1-2	-1,32	FS 5-3	-0,5
D 1-3	-1,32	FS 5-4	-0,5
D 1-4	-1,26	FW 1-1	-1,07
D 2-1	-1,26	FW 2-1	-1,2
D 2-2	-1,23	FW 2-2	-1,13
D 2-3	-1,29	FW 3-1	-1,13
D 2-4	-1,29	FW 4-1	-1,01
D 2-5	-1,35	FW 4-2	-0,88
D 3-1	-1,26	FW 5-1	-0,91
D 3-2	-1,26	FO 1-1	-1,26
D 3-3	-1,26	FO 2-1	-1,32
D 3-4	-1,29	FO 2-2	-1,29
D 4-1	-1,1	FO 2-3	-1,29
D 4-2	-1,13	FO 2-4	-1,35
D 4-3	-1,17	FO 3-1	-1,32
D 4-4	-1,2	FO 3-2	-1,29
D 5-1	-0,91	FO 4-1	-1,13
D 5-2	-0,95	FO 5-1	-1,32
D 5-3	-0,98	FO 6-1	-1,23
D 6-1	-0,85	FO 6-2	-1,32
D 6-2	-0,85	FO 6-3	-1,13
D 6-3	-0,85	FO 7-1	-1,07
D 6-4	-0,82	FO 7-2	-1,13
D 6-5	-0,79	FO 7-3	-0,72
D 7-1	-0,88	EN 1-1	0,28
D 7-2	-0,91	EN 2-1	0,32
D 7-3	-0,88		
D 7-4	-0,76		

Tabelle B2: Wind aus Nordosten

Messpunkte	c <sub>p</sub> -Werte	Messpunkte	c <sub>p</sub> -Werte
AH 1-1	-1,13	FS 1-1	-0,63
AH 1-2	-1,26	FS 1-2	-0,66
AH 1-3	-1,32	FS 2-1	-0,82
AH 2-1	-1,1	FS 2-2	-0,82
AH 2-2	-1,13	FS 2-3	-0,76
AH 2-3	-1,32	FS 2-4	-0,85
AV 1-1	-1,01	FS 3-1	-1,01
AV 1-2	-1,13	FS 3-2	-1,01
AV 1-3	-1,2	FS 3-3	-1,01
AV 1-4	-1,26	FS 3-4	-1,01
AV 1-5	-1,39	FS 4-1	-0,38
AV 2-1	-1,04	FS 4-2	-0,44
AV 2-2	-1,13	FS 4-3	-0,44
AV 2-3	-1,2	FS 4-4	-0,47
AV 2-4	-1,39	FS 5-1	-0,38
D 1-1	-0,28	FS 5-2	-0,44
D 1-2	-0,98	FS 5-3	-0,44
D 1-3	-1,07	FS 5-4	-0,47
D 1-4	-1,54	FW 1-1	-0,82
D 2-1	-0,82	FW 2-1	-0,88
D 2-2	-0,85	FW 2-2	-0,82
D 2-3	-0,95	FW 3-1	-0,88
D 2-4	-1,13	FW 4-1	-0,88
D 2-5	-2,27	FW 4-2	-0,88
D 3-1	-0,82	FW 5-1	-0,88
D 3-2	-0,76	FO 1-1	-0,82
D 3-3	-0,76	FO 2-1	-0,91
D 3-4	-1,01	FO 2-2	-0,88
D 4-1	-0,76	FO 2-3	-0,88
D 4-2	-0,69	FO 2-4	-0,88
D 4-3	-0,69	FO 3-1	-0,88
D 4-4	-0,63	FO 3-2	-0,85
D 5-1	-0,72	FO 4-1	-0,85
D 5-2	-0,57	FO 5-1	-0,95
D 5-3	-0,28	FO 6-1	-1,26
D 6-1	-0,57	FO 6-2	-0,88
D 6-2	-0,5	FO 6-3	-0,57
D 6-3	-0,44	FO 7-1	-1,45
D 6-4	-0,38	FO 7-2	-0,63
D 6-5	-0,32	FO 7-3	-0,28
D 7-1	-0,57	EN 1-1	-0,25
D 7-2	-0,6	EN 2-1	-0,25
D 7-3	-0,63		
D 7-4	-0,66		

Tabelle B3: Wind aus Osten

Messpunkte	c <sub>p</sub> -Werte	Messpunkte	c <sub>p</sub> -Werte
AH 1-1	-1,2	FS 1-1	-0,95
AH 1-2	-1,2	FS 1-2	-0,91
AH 1-3	-1,26	FS 2-1	-0,72
AH 2-1	-1,1	FS 2-2	-0,72
AH 2-2	-1,13	FS 2-3	-0,69
AH 2-3	-1,23	FS 2-4	-0,72
AV 1-1	-0,98	FS 3-1	-0,72
AV 1-2	-1,17	FS 3-2	-0,69
AV 1-3	-1,26	FS 3-3	-0,69
AV 1-4	-1,23	FS 3-4	-0,69
AV 1-5	-1,26	FS 4-1	-0,69
AV 2-1	-1,04	FS 4-2	-0,69
AV 2-2	-1,13	FS 4-3	-0,69
AV 2-3	-1,17	FS 4-4	-0,69
AV 2-4	-1,23	FS 5-1	-0,69
D 1-1	-0,66	FS 5-2	-0,69
D 1-2	-1,07	FS 5-3	-0,69
D 1-3	-1,2	FS 5-4	-0,69
D 1-4	-1,23	FW 1-1	-0,82
D 2-1	-1,04	FW 2-1	-1,07
D 2-2	-1,01	FW 2-2	-0,82
D 2-3	-1,07	FW 3-1	-1,07
D 2-4	-1,13	FW 4-1	-1,13
D 2-5	-1,32	FW 4-2	-1,01
D 3-1	-0,95	FW 5-1	-0,95
D 3-2	-0,95	FO 1-1	-1,32
D 3-3	-1,04	FO 2-1	-1,42
D 3-4	-1,26	FO 2-2	-1,35
D 4-1	-0,98	FO 2-3	-1,39
D 4-2	-0,95	FO 2-4	-1,32
D 4-3	-1,04	FO 3-1	-1,35
D 4-4	-1,17	FO 3-2	-1,32
D 5-1	-0,91	FO 4-1	-1,32
D 5-2	-0,98	FO 5-1	-1,42
D 5-3	-1,1	FO 6-1	-1,35
D 6-1	-1,04	FO 6-2	-0,63
D 6-2	-1,04	FO 6-3	-1,62
D 6-3	-1,13	FO 7-1	-1,32
D 6-4	-1,1	FO 7-2	-1,26
D 6-5	-1,2	FO 7-3	-0,6
D 7-1	-1,2	EN 1-1	-0,6
D 7-2	-1,29	EN 2-1	-0,44
D 7-3	-1,32		
D 7-4	-1,39		

Tabelle B4: Wind aus Südosten

Messpunkte	c <sub>p</sub> -Werte	Messpunkte	c <sub>p</sub> -Werte
AH 1-1	-0,6	FS 1-1	-0,88
AH 1-2	-0,69	FS 1-2	-0,88
AH 1-3	-0,76	FS 2-1	0,03
AH 2-1	-0,5	FS 2-2	0,06
AH 2-2	-0,54	FS 2-3	0,06
AH 2-3	-0,63	FS 2-4	0,13
AV 1-1	-0,38	FS 3-1	0
AV 1-2	-0,44	FS 3-2	0
AV 1-3	-0,47	FS 3-3	0
AV 1-4	-0,57	FS 3-4	0,06
AV 1-5	-0,69	FS 4-1	-0,03
AV 2-1	-0,44	FS 4-2	-0,06
AV 2-2	-0,44	FS 4-3	0,06
AV 2-3	-0,44	FS 4-4	0,06
AV 2-4	-0,6	FS 5-1	-0,03
D 1-1	-0,25	FS 5-2	0
D 1-2	-0,44	FS 5-3	0,03
D 1-3	-0,5	FS 5-4	0,06
D 1-4	-0,54	FW 1-1	-0,6
D 2-1	-0,5	FW 2-1	-0,82
D 2-2	-0,5	FW 2-2	-0,63
D 2-3	-0,54	FW 3-1	-0,95
D 2-4	-0,6	FW 4-1	-0,95
D 2-5	-0,63	FW 4-2	-0,95
D 3-1	-0,69	FW 5-1	-0,88
D 3-2	-0,63	FO 1-1	-0,66
D 3-3	-0,63	FO 2-1	-1,26
D 3-4	-0,79	FO 2-2	-1,01
D 4-1	-0,76	FO 2-3	-0,91
D 4-2	-0,72	FO 2-4	-0,98
D 4-3	-0,76	FO 3-1	-1,07
D 4-4	-0,69	FO 3-2	-1,01
D 5-1	-0,63	FO 4-1	-1,01
D 5-2	-0,82	FO 5-1	-1,13
D 5-3	-0,88	FO 6-1	-1,01
D 6-1	-1,35	FO 6-2	-1,01
D 6-2	-1,35	FO 6-3	-0,95
D 6-3	-1,39	FO 7-1	-0,88
D 6-4	-1,39	FO 7-2	-0,85
D 6-5	-1,39	FO 7-3	-0,88
D 7-1	-2,21	EN 1-1	-0,5
D 7-2	-2,3	EN 2-1	-0,57
D 7-3	-2,39		
D 7-4	-2,39		

Tabelle B5: Wind aus Süden

Messpunkte	c <sub>p</sub> -Werte	Messpunkte	c <sub>p</sub> -Werte
AH 1-1	-0,44	FS 1-1	-0,63
AH 1-2	-0,28	FS 1-2	-0,57
AH 1-3	-0,25	FS 2-1	0,88
AH 2-1	-0,28	FS 2-2	0,88
AH 2-2	-0,16	FS 2-3	0,79
AH 2-3	-0,19	FS 2-4	0,88
AV 1-1	-0,32	FS 3-1	0,85
AV 1-2	-0,32	FS 3-2	0,82
AV 1-3	-0,16	FS 3-3	0,85
AV 1-4	-0,13	FS 3-4	0,85
AV 1-5	-0,16	FS 4-1	0,76
AV 2-1	-0,32	FS 4-2	0,76
AV 2-2	-0,06	FS 4-3	0,79
AV 2-3	-0,09	FS 4-4	0,79
AV 2-4	-0,19	FS 5-1	0,82
D 1-1	-0,13	FS 5-2	0,79
D 1-2	-0,13	FS 5-3	0,79
D 1-3	-0,13	FS 5-4	0,82
D 1-4	-0,19	FW 1-1	0,19
D 2-1	-0,06	FW 2-1	-0,03
D 2-2	-0,13	FW 2-2	0,06
D 2-3	-0,19	FW 3-1	-0,28
D 2-4	-0,22	FW 4-1	-0,57
D 2-5	-0,32	FW 4-2	-0,44
D 3-1	-0,19	FW 5-1	-0,38
D 3-2	-0,25	FO 1-1	-0,41
D 3-3	-0,32	FO 2-1	-0,76
D 3-4	-0,47	FO 2-2	-0,63
D 4-1	-0,32	FO 2-3	-0,63
D 4-2	-0,32	FO 2-4	-0,5
D 4-3	-0,38	FO 3-1	-0,72
D 4-4	-0,54	FO 3-2	-0,63
D 5-1	-0,47	FO 4-1	-0,63
D 5-2	-0,5	FO 5-1	-0,69
D 5-3	-0,54	FO 6-1	-0,82
D 6-1	-1,2	FO 6-2	-0,63
D 6-2	-1,32	FO 6-3	-0,6
D 6-3	-1,48	FO 7-1	-0,6
D 6-4	-1,51	FO 7-2	-0,5
D 6-5	-1,51	FO 7-3	-0,47
D 7-1	-2,52	EN 1-1	-0,47
D 7-2	-2,52	EN 2-1	-0,44
D 7-3	-2,46		
D 7-4	-2,27		

Tabelle B6: Wind aus Südwesten

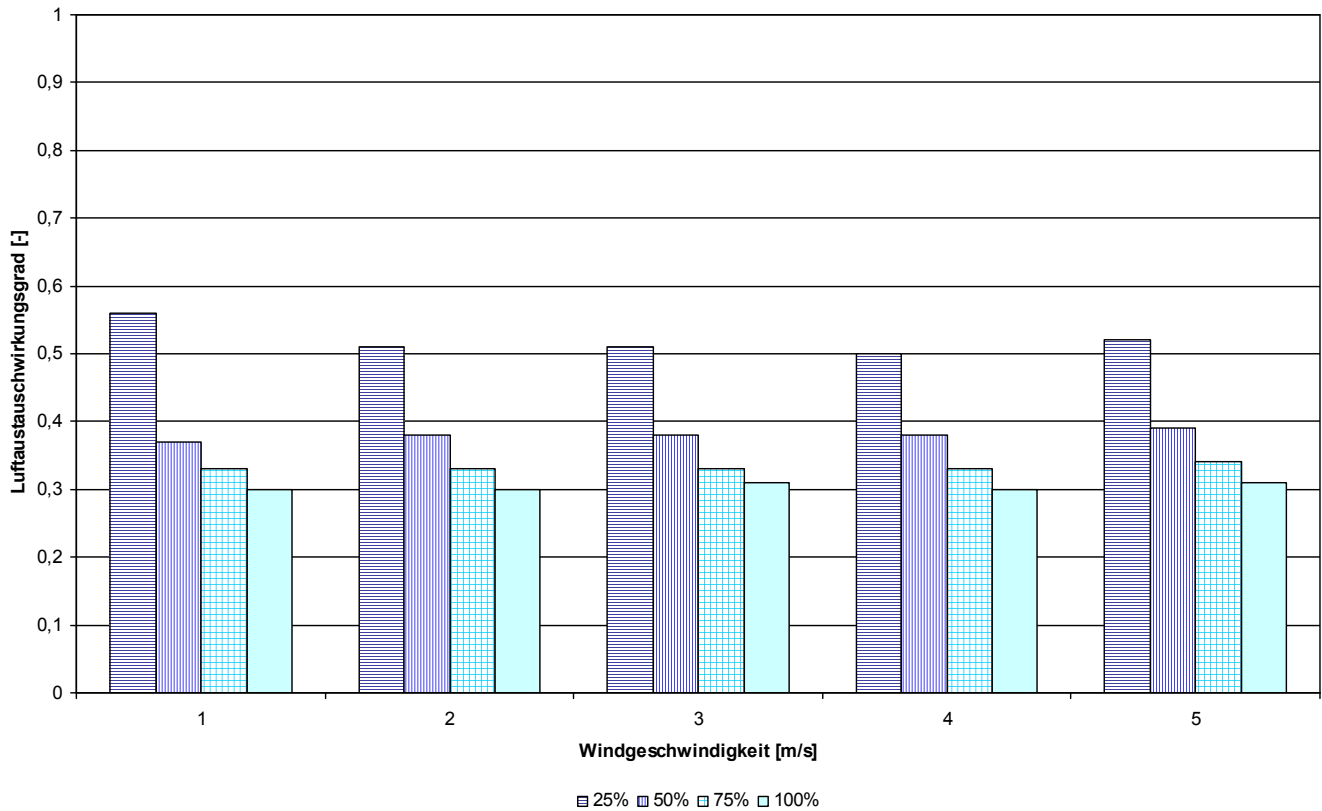
Messpunkte	c <sub>p</sub> -Werte	Messpunkte	c <sub>p</sub> -Werte
AH 1-1	-0,88	FS 1-1	-0,19
AH 1-2	-0,88	FS 1-2	-0,25
AH 1-3	-0,88	FS 2-1	0,28
AH 2-1	-0,88	FS 2-2	0,25
AH 2-2	-0,82	FS 2-3	0,19
AH 2-3	-0,82	FS 2-4	0,25
AV 1-1	-0,76	FS 3-1	0,28
AV 1-2	-0,88	FS 3-2	0,25
AV 1-3	-0,82	FS 3-3	0,32
AV 1-4	-0,72	FS 3-4	0,25
AV 1-5	-1,04	FS 4-1	0,28
AV 2-1	-0,82	FS 4-2	0,32
AV 2-2	-0,82	FS 4-3	0,28
AV 2-3	-0,76	FS 4-4	0,28
AV 2-4	-0,88	FS 5-1	0,32
D 1-1	-0,82	FS 5-2	0,32
D 1-2	-0,91	FS 5-3	0,25
D 1-3	-0,72	FS 5-4	0,25
D 1-4	-0,63	FW 1-1	0,95
D 2-1	-1,2	FW 2-1	0,63
D 2-2	-0,95	FW 2-2	0,88
D 2-3	-0,76	FW 3-1	0,82
D 2-4	-0,47	FW 4-1	0,88
D 2-5	-0,32	FW 4-2	0,88
D 3-1	-1,51	FW 5-1	0,35
D 3-2	-0,5	FO 1-1	0,03
D 3-3	-0,28	FO 2-1	-0,38
D 3-4	-0,22	FO 2-2	-0,19
D 4-1	-1,23	FO 2-3	-0,06
D 4-2	-0,32	FO 2-4	0
D 4-3	-0,28	FO 3-1	-0,13
D 4-4	-0,25	FO 3-2	-0,06
D 5-1	-0,44	FO 4-1	-0,06
D 5-2	-0,25	FO 5-1	-0,38
D 5-3	-0,22	FO 6-1	-0,32
D 6-1	-0,32	FO 6-2	-0,41
D 6-2	-0,38	FO 6-3	-0,13
D 6-3	-0,38	FO 7-1	-0,38
D 6-4	-0,38	FO 7-2	-0,32
D 6-5	-0,38	FO 7-3	-0,19
D 7-1	-0,76	EN 1-1	-0,69
D 7-2	-0,76	EN 2-1	-0,82
D 7-3	-0,82		
D 7-4	-0,85		

Tabelle B7: Wind aus Westen

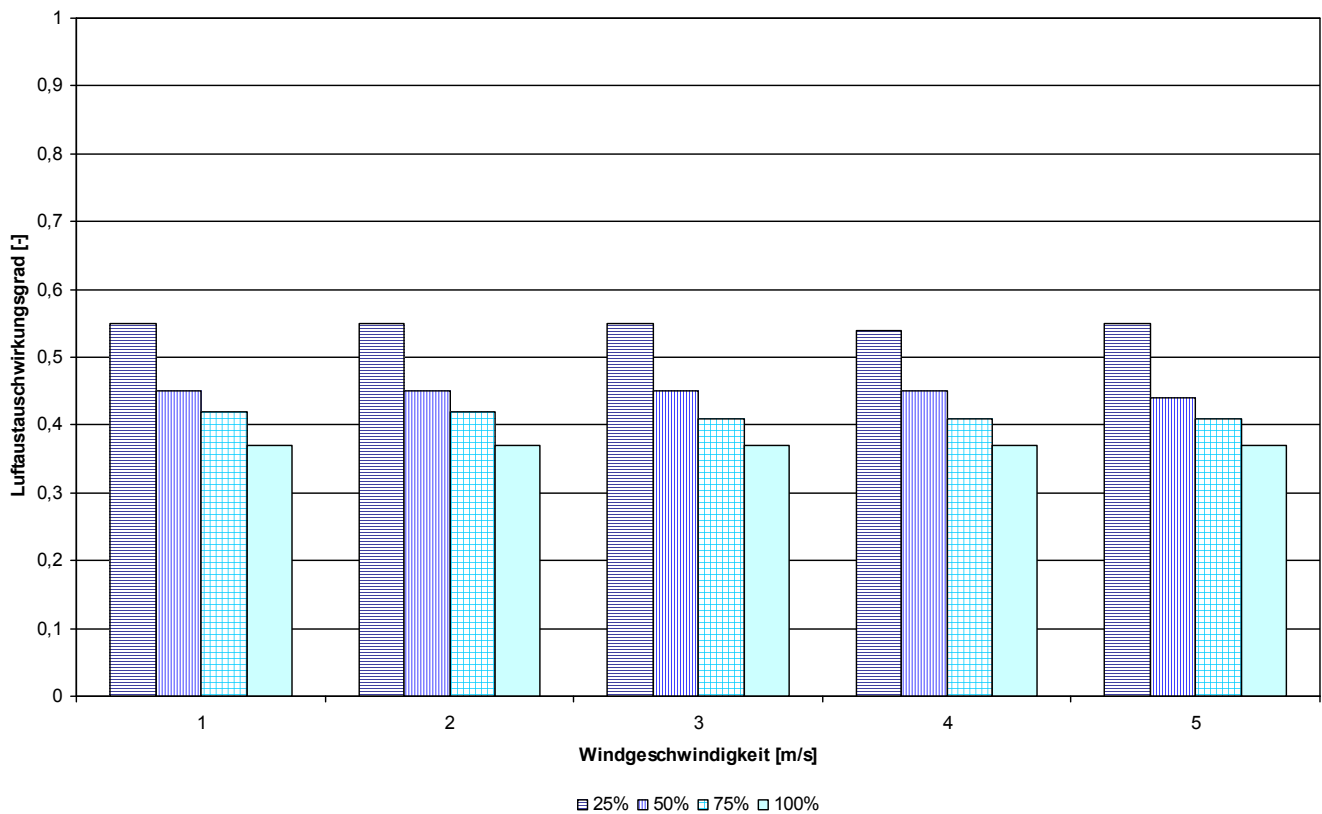
Messpunkte	c <sub>p</sub> -Werte	Messpunkte	c <sub>p</sub> -Werte
AH 1-1	-1,32	FS 1-1	-0,98
AH 1-2	-0,79	FS 1-2	-0,82
AH 1-3	-0,09	FS 2-1	-0,85
AH 2-1	-1,2	FS 2-2	-0,82
AH 2-2	-0,69	FS 2-3	-0,69
AH 2-3	-0,06	FS 2-4	-0,69
AV 1-1	-1,01	FS 3-1	-0,79
AV 1-2	-1,2	FS 3-2	-0,79
AV 1-3	-0,88	FS 3-3	-0,76
AV 1-4	-0,09	FS 3-4	-0,66
AV 1-5	0,16	FS 4-1	-0,72
AV 2-1	-1,2	FS 4-2	-0,69
AV 2-2	-0,95	FS 4-3	-0,66
AV 2-3	-0,28	FS 4-4	-0,6
AV 2-4	0,09	FS 5-1	-0,72
D 1-1	-0,19	FS 5-2	-0,69
D 1-2	-1,17	FS 5-3	-0,63
D 1-3	-1,04	FS 5-4	-0,6
D 1-4	-0,82	FW 1-1	0,88
D 2-1	-1,13	FW 2-1	0,85
D 2-2	-1,17	FW 2-2	0,85
D 2-3	-1,04	FW 3-1	0,79
D 2-4	-0,72	FW 4-1	0,5
D 2-5	-0,47	FW 4-2	0,85
D 3-1	-1,1	FW 5-1	0,88
D 3-2	-1,1	FO 1-1	-0,35
D 3-3	-0,88	FO 2-1	-0,41
D 3-4	-0,54	FO 2-2	-0,32
D 4-1	-1,07	FO 2-3	-0,32
D 4-2	-1,07	FO 2-4	-0,32
D 4-3	-0,85	FO 3-1	-0,28
D 4-4	-0,57	FO 3-2	-0,28
D 5-1	-1,26	FO 4-1	-0,28
D 5-2	-0,88	FO 5-1	-0,35
D 5-3	-0,6	FO 6-1	-0,38
D 6-1	-0,88	FO 6-2	-0,32
D 6-2	-0,82	FO 6-3	-0,25
D 6-3	-0,69	FO 7-1	-0,32
D 6-4	-0,63	FO 7-2	-0,28
D 6-5	-0,57	FO 7-3	-0,25
D 7-1	-0,91	EN 1-1	-0,13
D 7-2	-0,88	EN 2-1	-0,13
D 7-3	-0,79		
D 7-4	-0,63		

Tabelle B8: Wind aus Nordwesten

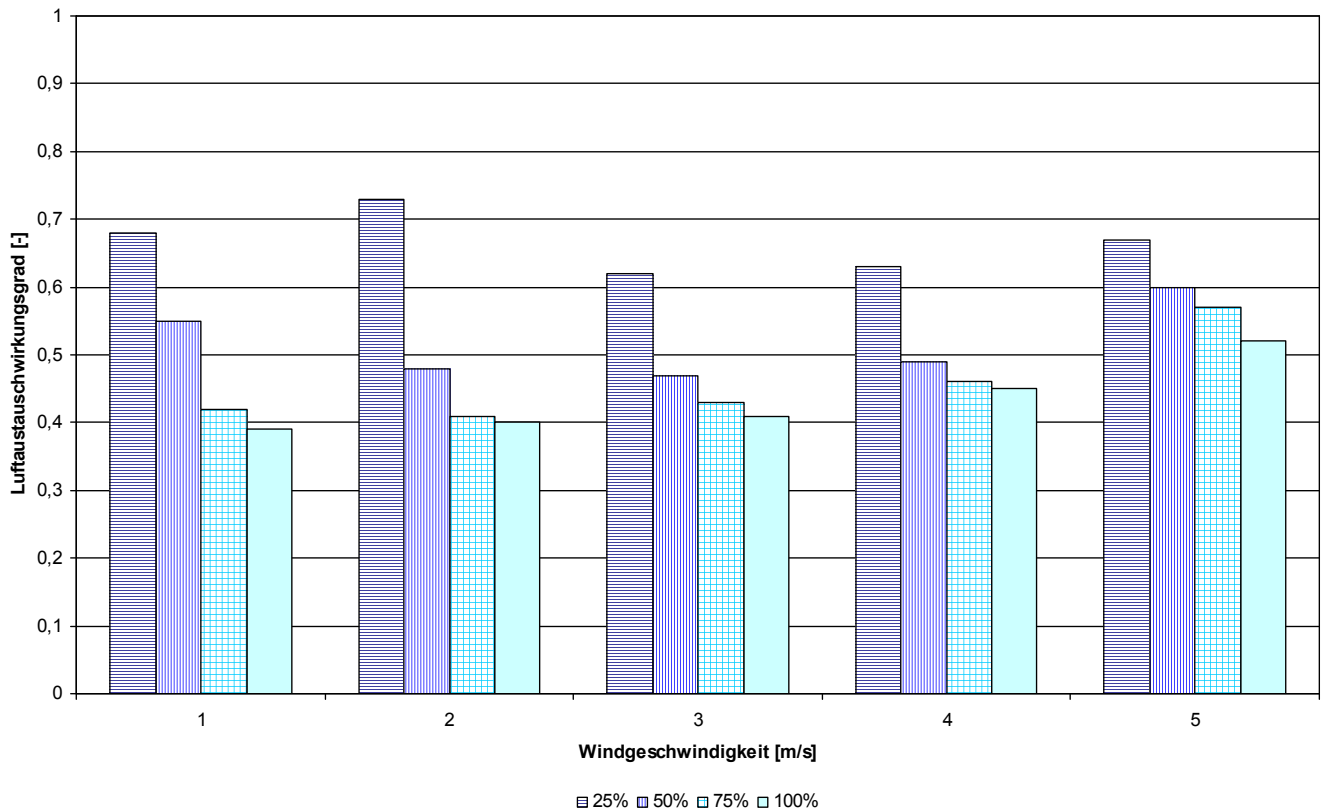


**C: Luftaustauschwirkungsgrade für alle untersuchten Varianten**

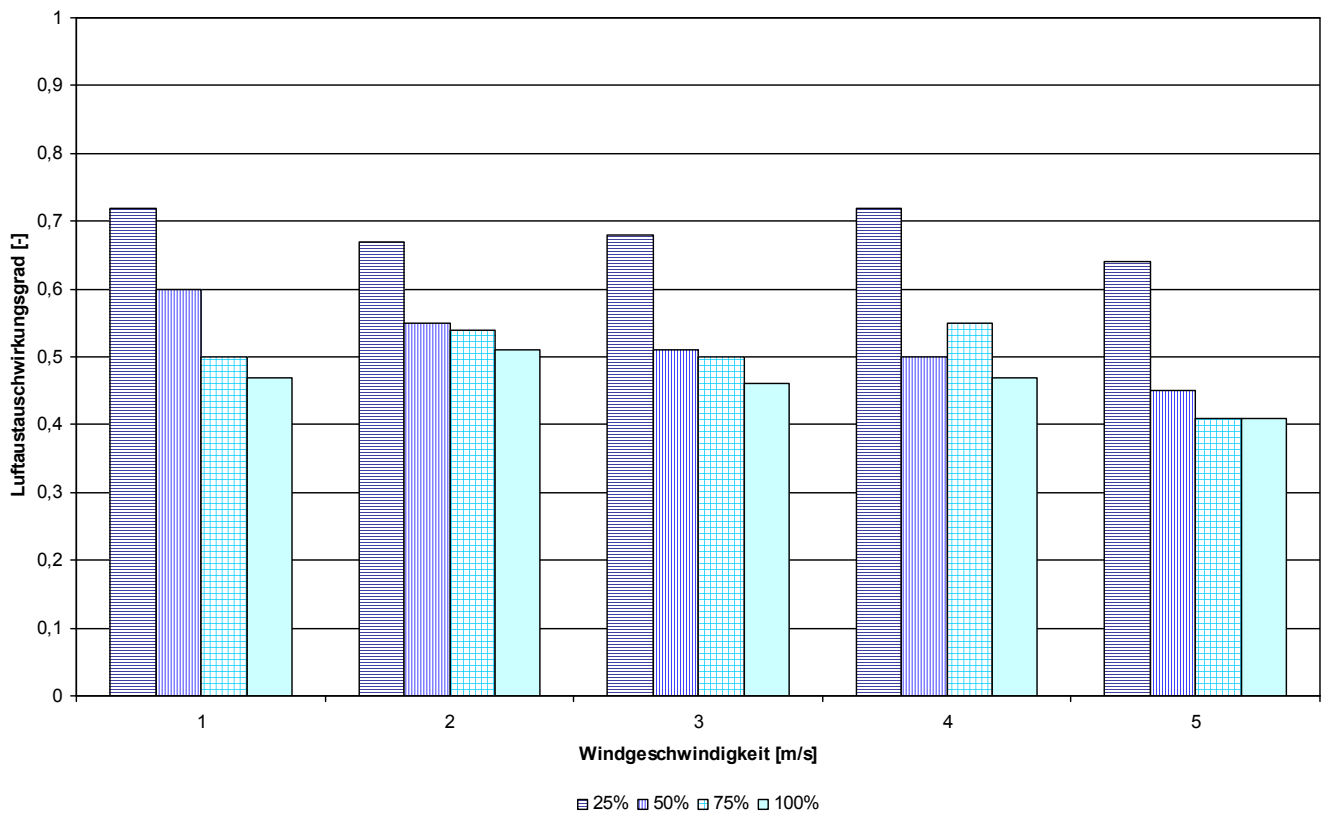
**Bild C1: Luftaustauschwirkungsgrad abhängig von der Windgeschwindigkeit und dem Öffnungsanteil der Zu- und Abluftfläche; Anströmrichtung 0°**



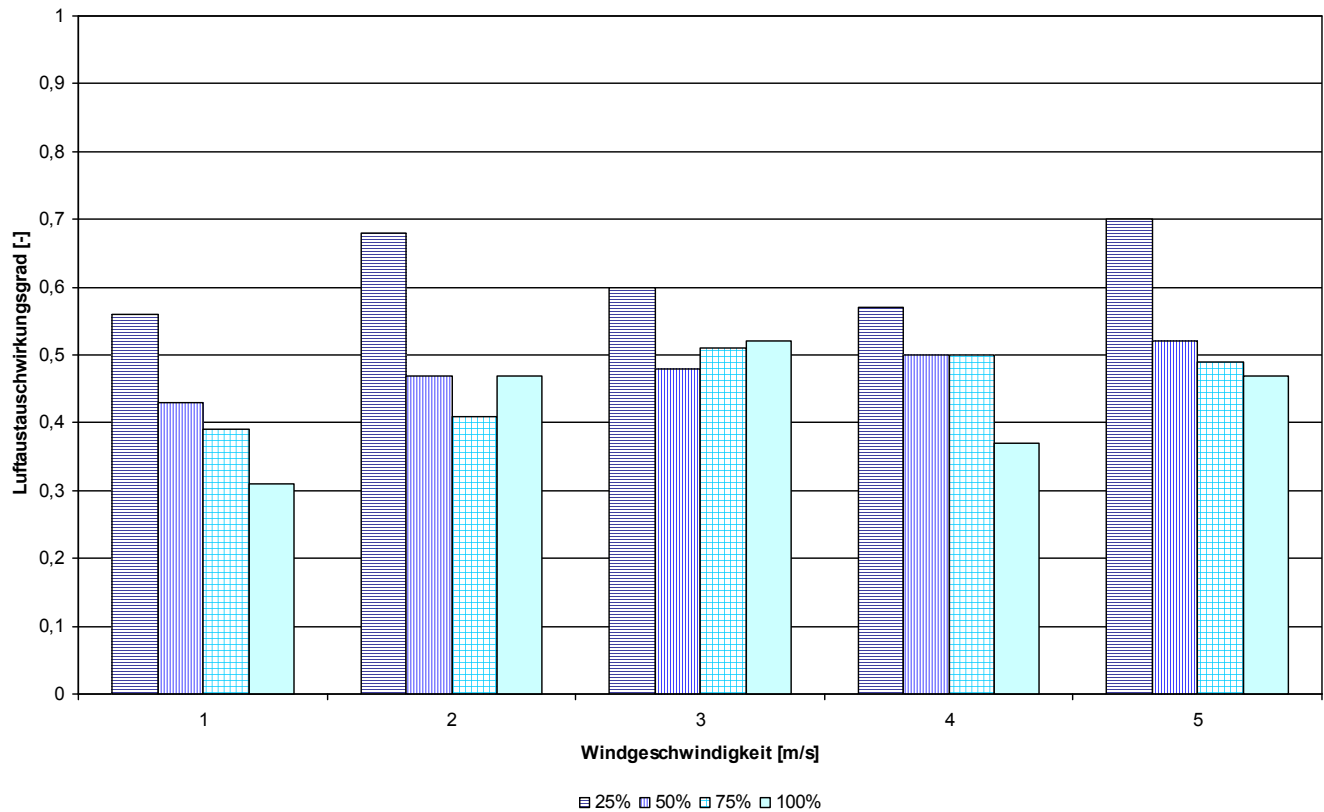
**Bild C2: Luftaustauschwirkungsgrad abhängig von der Windgeschwindigkeit und dem Öffnungsanteil der Zu- und Abluftfläche; Anströmrichtung 45°**



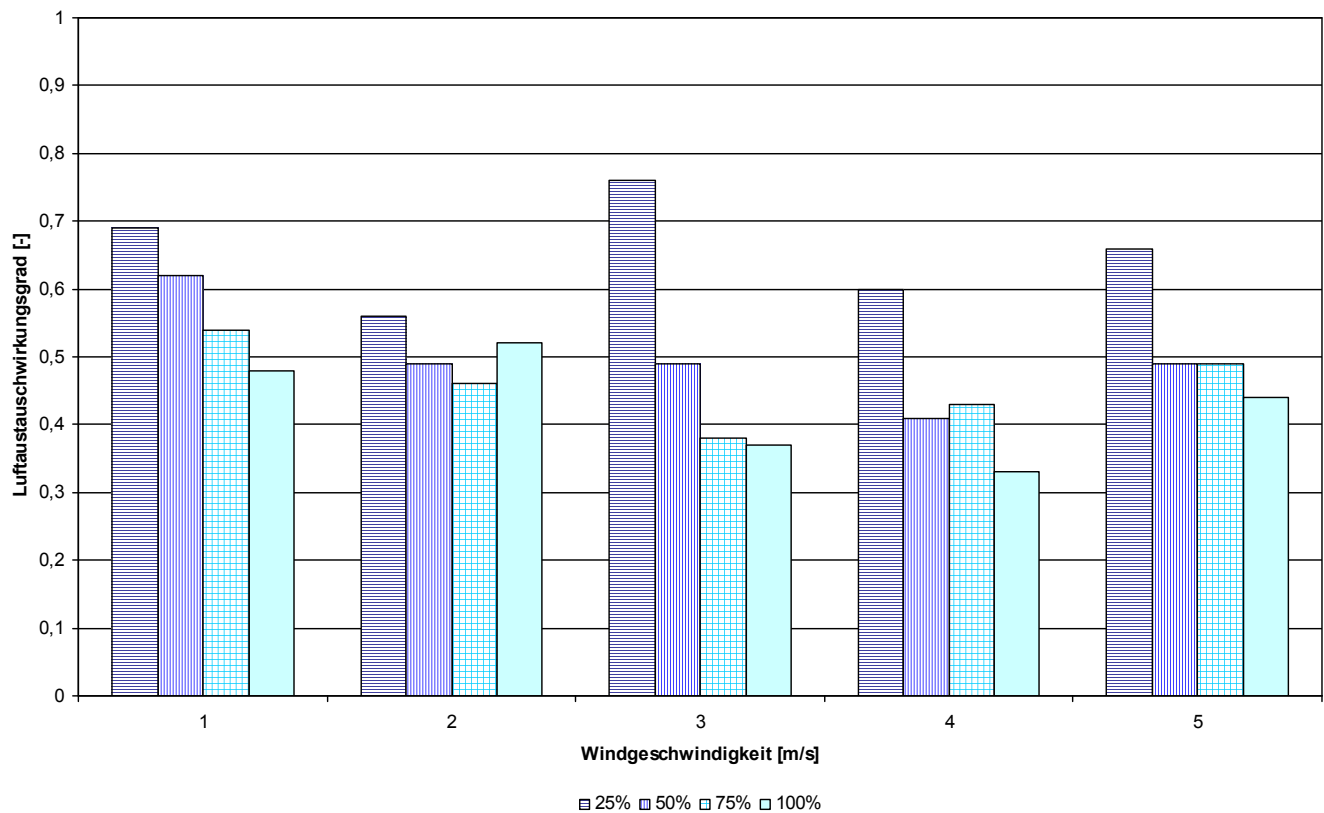
**Bild C3: Luftaustauschwirkungsgrad abhängig von der Windgeschwindigkeit und dem Öffnungsanteil der Zu- und Abluftfläche; Anströmrichtung 90°**



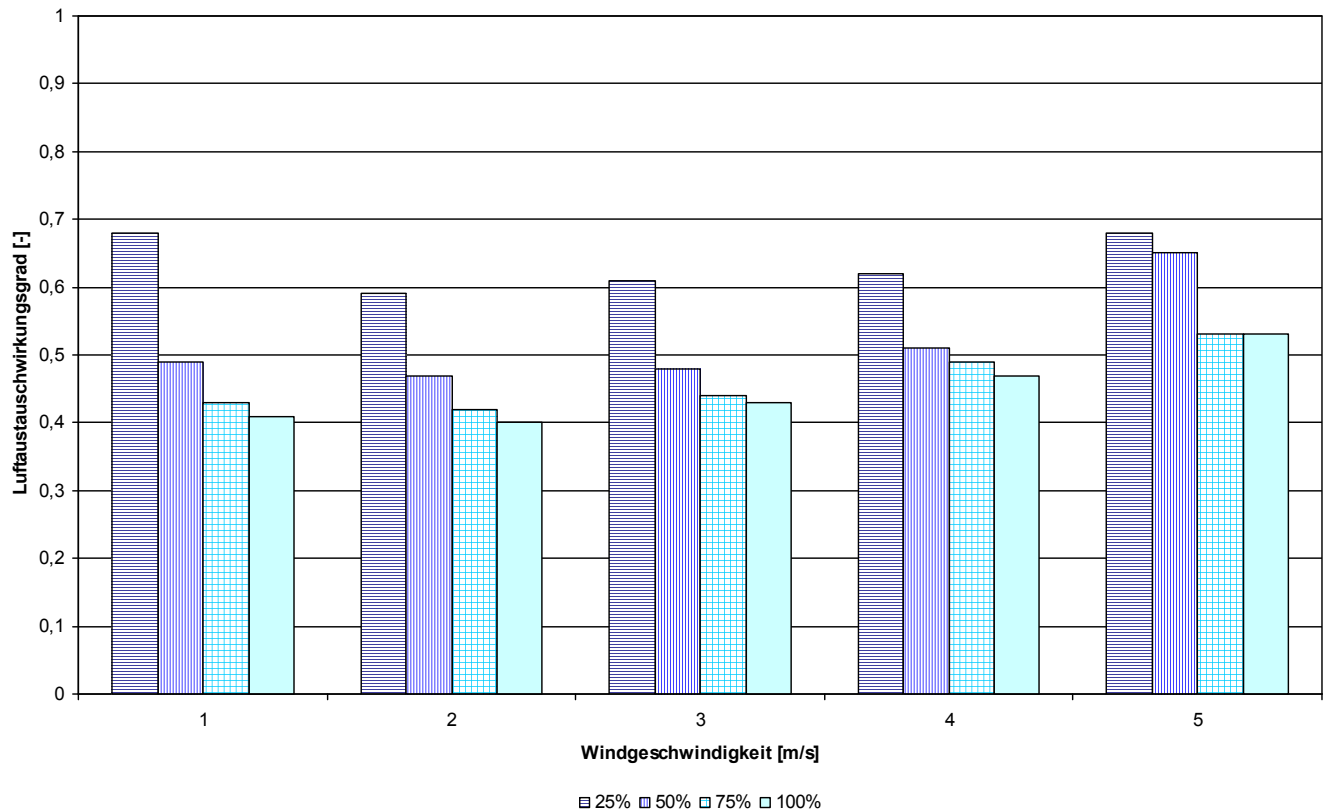
**Bild C4: Luftaustauschwirkungsgrad abhängig von der Windgeschwindigkeit und dem Öffnungsanteil der Zu- und Abluftfläche; Anströmrichtung 135°**



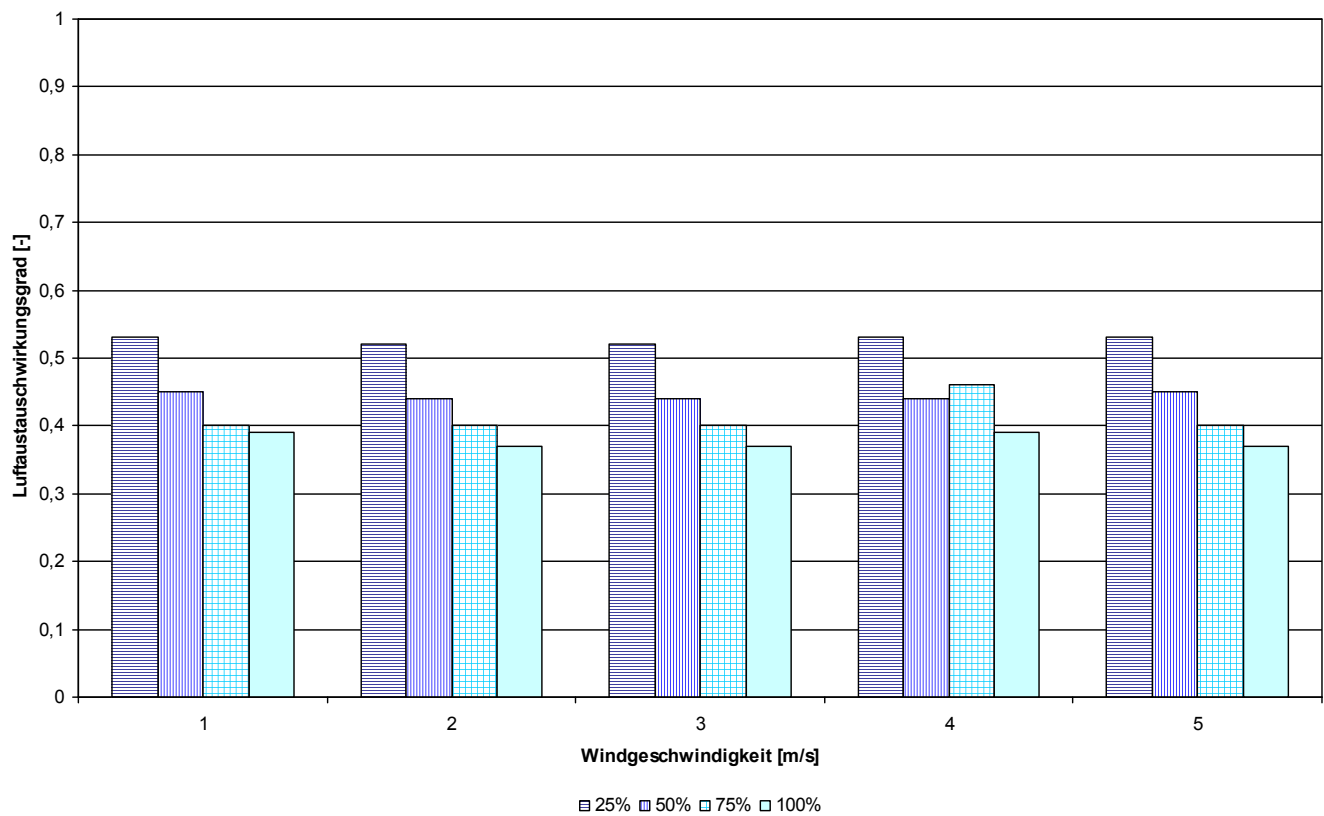
**Bild C5: Luftaustauschwirkungsgrad abhängig von der Windgeschwindigkeit und dem Öffnungsanteil der Zu- und Abluftfläche; Anströmrichtung 180°**



**Bild C6: Luftaustauschwirkungsgrad abhängig von der Windgeschwindigkeit und dem Öffnungsanteil der Zu- und Abluftfläche; Anströmrichtung 225°**



**Bild C7: Luftaustauschwirkungsgrad abhängig von der Windgeschwindigkeit und dem Öffnungsanteil der Zu- und Abluftfläche; Anströmrichtung 270°**



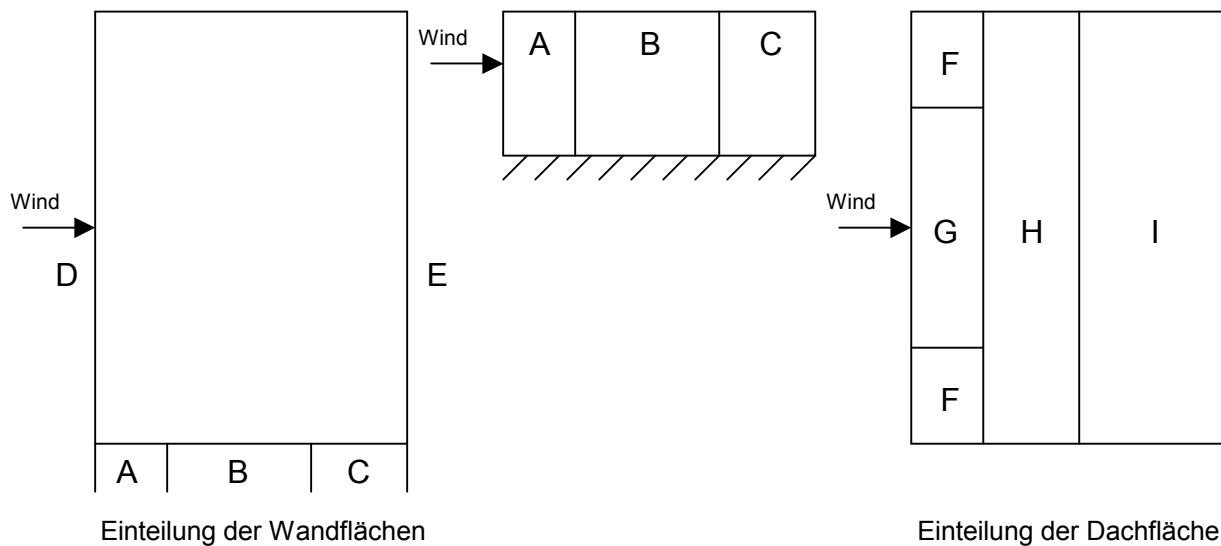
**Bild C8: Luftaustauschwirkungsgrad abhängig von der Windgeschwindigkeit und dem Öffnungsanteil der Zu- und Abluftfläche; Anströmrichtung 315°**

## D: Erläuterungen

### D1: Windgeschwindigkeiten und Beaufort-Skala

Beaufort-Skala	Bezeichnung	Windgeschwindigkeit	
		[m/s]	[km/h]
0	Windstille	0 - 0,2	0 - 0,7
1	schwacher Wind	0,9	3,2
2	leichte Brise	2,5	9
3	schwache Brise	4,4	15,8
4	mäßige Brise	6,7	24,1
5	frische Brise	9,3	33,4
6	starker Wind	12,3	44,3
7	steifer Wind	15,5	55,8
8	stürmischer Wind	19	68,4
9	Sturm	22,6	80,6
10	schwerer Sturm	26,6	95,8
11	orkanartiger Sturm	30,6	110,2
12	Orkan	34,8	125,3
13	Wirbelstürme	39,2	141,1
14	Wirbelstürme	43,8	157,7
15	Wirbelstürme	48,6	175
16	Wirbelstürme	53,5	192,6
17	Wirbelstürme	> 56	> 201

### D2: Verteilung der Druckbeiwerte gem. DIN 1055



Bereiche	A	B	C	D	E	F	G	H	I
$C_{pe,1}$	-1,4	-1,1	-0,5	1,0	-0,5	-2,5	-2,0	-1,2	0,2
$C_{pe,10}$	-1,2	-0,8	-0,5	<b>0,8</b>	<b>-0,5</b>	-1,8	-1,2	-0,7	0,2

**Bild D1: Einteilung der Wand- und Dachflächen bei Flachdächern mit scharfkantigem Traufbereich (Auszug DIN 1055-4:2005-03, vereinfachte Darstellung)**